

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

برطرف کردن مشکلات تصویرسازی لرزه‌ای در ساختارهای پیچیده به  
کمک روش کوچ زمانی معکوس، مثال موردی در غرب ایران

سجاد تقی‌زاده

اساتید راهنما:

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

دکتر ایرج پیروز

خرداد ۱۳۹۳

تقدیم ہے

خانوادہ عزیزم

## شکر و قدردانی

از زحمات و راهنمایی های استاد کرامتدرا؛ جناب آقای دکتر سلیمانی که در تمامی مراحل محارث این اثر مروری نمودند، شکر می نمایم.

همچنین از دوستان عزیزم آقایان امیر شامیری، مرتضی رحمانی، بهزاد نظری و کیانوش سلیمانی به جهت یاری اینجانب در آماده کردن این اثر، قدردانی می کنم. و در آخر بر خود واجب می دانم از تمامی

عزیزانی که مراد از هر چه بهترین اثری نمودند، شکر کرده و دست آنها را به گرمی می فشارم.

## چکیده

هدف نهایی از برداشت داده‌های لرزه‌ای و انجام مراحل پردازش بر روی آن‌ها، بدست آوردن تصاویر هر چه دقیق‌تر و واقعی‌تر از ساختارهای زیر سطح زمین می‌باشد. یکی از مراحل پردازش داده‌های لرزه‌ای، کوچ می‌باشد که عبارتست از، عمل بازگردان وقایع پراش در ثبت‌های کوچ داده نشده به نقاط قله آنها و در نتیجه انتقال وقایع بازتابی به مکان‌های صحیح‌شان و ساختن یک تصویر از ساختارهای درون زمین. کوچ زمانی معکوس به دلیل اینکه بر پایه معادله موج دوطرفه عمل می‌کند، در مقاطع لرزه‌ای با ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، نسبت به دیگر روش‌های کوچ، که بر پایه معادله موج یک‌طرفه عمل می‌کنند، تصویرسازی مناسب‌تر و دقیق‌تری از ساختارهای زیرسطحی ارائه می‌دهد. در روش کوچ زمانی معکوس شرایط تصویرسازی با همبستگی عرضی میدان موج چشمه و میدان موج گیرنده تخمین زده می‌شود. در امپدانس‌های بزرگ و ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، میدان‌های موج پایین‌رونده و بالارونده نمی‌توانند تفکیک شوند. با این حال در این موارد همبستگی عرضی منجر به کاهش فرکانس‌های مصنوعی پایین می‌شود که باعث تفکیک هر چه بهتر میدان‌های موج چشمه و گیرنده خواهد شد. در این تحقیق، دقت و درستی عملکرد روش مهاجرت زمانی معکوس در پردازش و تصویرسازی داده‌های لرزه‌ای در ساختارهای پیچیده مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، مدل‌های سرعت لرزه‌ای تولید شده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی دو منطقه Sigsbee 2A و BP-2004 را، با اعمال کوچ زمانی کیرشهوف و کوچ زمانی معکوس بررسی و مقاطع لرزه‌ای بدست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین روش پردازشی مورد بحث در این تحقیق بر داده‌های لرزه‌ای واقعی دو منطقه یکی در غرب ایران و دیگری در مرز آلمان و فرانسه، اعمال شد که متأسفانه به دلیل نداشتن امکانات سخت‌افزاری و محاسباتی پیشرفته نتایج قابل قبولی حاصل نگردید. **واژه‌های کلیدی:** تصویرسازی لرزه‌ای؛ مهاجرت زمانی معکوس؛ همبستگی عرضی؛ برونمایی میدان موج.

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- مقایسه روش‌های مهاجرت زمانی معکوس RTM و مهاجرت زمانی کیرشهوف در تصویرسازی داده‌های لرزه‌ای برای شناسایی گنبد نمکی، اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی، دانشگاه شاهرود، پاییز ۱۳۹۲.

۲- تصویرسازی لرزه‌ای با روش مهاجرت زمانی معکوس در شناسایی گسل‌ها، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، بهار ۱۳۹۳.

۳- مقایسه روش‌هایی مهاجرت زمانی معکوس و کیرشهوف در تصویرسازی لرزه‌ای برای شناسایی گسل‌ها، اولین همایش تخصصی کاربرد ریاضیات در علوم زمین، دانشگاه شیراز، بهار ۱۳۹۳.

## فهرست مطالب

| عنوان                                    | شماره صفحه |
|------------------------------------------|------------|
| تشکر و قدردانی.....                      | د          |
| چکیده.....                               | ه          |
| فهرست مطالب.....                         | ز          |
| فهرست شکلها.....                         | ط          |
| فهرست جداول.....                         | م          |
| فهرست علائم و اختصارات.....              | ن          |
| ۱ فصل اول.....                           | ۱          |
| ۱-۱ مقدمه.....                           | ۲          |
| ۲-۱ برداشت داده‌های لرزه‌ای بازتابی..... | ۳          |
| ۳-۱ پردازش داده‌های لرزه‌ای.....         | ۵          |
| ۱-۳-۱ پیش پردازش.....                    | ۵          |
| ۲-۳-۱ شبیه‌سازی مقطع با دورافت صفر.....  | ۵          |
| ۱-۲-۳-۱ برانبارش NMO/DMO.....            | ۶          |
| ۳-۳-۱ کوچ.....                           | ۷          |
| ۴-۱ تفسیر داده‌های لرزه‌ای.....          | ۱۱         |
| ۵-۱ ساختار پایان‌نامه.....               | ۱۱         |
| ۲ فصل دوم.....                           | ۱۳         |
| ۱-۲ مقدمه.....                           | ۱۴         |
| ۲-۲ تصویرسازی بر مبنای تئوری پرتو.....   | ۱۵         |
| ۱-۲-۲ کوچ اشعه گاوسی.....                | ۱۷         |

|    |                                                             |
|----|-------------------------------------------------------------|
| ۱۸ | ۲-۲-۲ روش‌های تمرکز چندگانه .....                           |
| ۱۹ | ۳-۲ تصویرسازی بر مبنای حل معادله موج .....                  |
| ۱۹ | ۱-۳-۲ روش‌های حل معادله موج یکطرفه .....                    |
| ۲۲ | ۱-۱-۳-۲ شرایط تصویرسازی .....                               |
| ۲۴ | ۲-۱-۳-۲ برونیابی عمق در مقابل زمان .....                    |
| ۲۷ | ۳-۱-۳-۲ اصول کوچ چشمه یکطرفه .....                          |
| ۳۳ | ۲-۳-۱-۴ استفاده از تمام چشمه‌ها .....                       |
| ۳۶ | ۵-۱-۳-۲ کوچ زمانی کیرشهوف .....                             |
| ۳۷ | ۶-۱-۳-۲ مزایا و معایب کوچ زمانی .....                       |
| ۳۸ | ۲-۳-۲ روش‌های تصویرسازی مبتنی بر حل معادله موج دوطرفه ..... |
| ۳۹ | ۱-۲-۳-۲ وارونسازی کامل شکل موج .....                        |
| ۴۳ | ۳ فصل سوم .....                                             |
| ۴۴ | ۱-۳ مقدمه .....                                             |
| ۴۵ | ۲-۳ اصول و روندکار RTM .....                                |
| ۵۰ | ۱-۲-۳ کنترل تمامی چشمه‌ها در RTM .....                      |
| ۵۱ | ۳-۳ برونیابی زمانی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود ..... |
| ۵۶ | ۴-۳ انجام روش RTM بر داده‌های لرزه‌ای مصنوعی .....          |
| ۵۶ | ۱-۴-۳ داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A .....                  |
| ۶۵ | ۲-۴-۳ داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004 .....                     |
| ۷۱ | ۳-۴-۳ داده لرزه‌ای واقعی .....                              |
| ۷۴ | ۴ فصل چهارم .....                                           |
| ۷۵ | ۱-۴ نتایج .....                                             |
| ۷۷ | منابع .....                                                 |

## فهرست شکل‌ها

| عنوان                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | شماره صفحه |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| شکل ۱-۱: روند کلی در استفاده از لرزه‌نگاری بازتابی. تهیه مقطع لرزه‌ای به کمک ارسال امواج لرزه‌ای به درون زمین، بازتاب آنها از لایه‌ها و آشکارسازی ساختارهای زمین شناسی به کمک پردازش داده‌های لرزه‌ای [بعد از خلیلزاده، ۱۳۹۲].                                                                                                                  | ۳          |
| شکل ۲-۱: مقایسه وضعیت (a) نقطه میانی مشترک (CMP) و (b) نقطه‌ی بازتاب مشترک (CRP). برای لایه‌های ناهمگن یا لایه‌ای با سرعت‌های جانبی متغیر، در یک دسته CMP پراکندگی نقطه‌ی بازتاب مشاهده می‌شود یعنی بازتاب‌ها از یک نقطه‌ی یکسان نیستند [اشپینر، ۲۰۰۷].                                                                                         | ۷          |
| شکل ۳-۱: محدوده کارکرد کوچ قبل و بعد از برانبارش عمقی و زمانی. کوچ زمانی برای محیط‌های با تغییرات ملایم سرعت مناسبتر است و در مناطق با ناهمگونی جانبی شدید نیازمند به اعمال کوچ عمقی می‌باشد. در مناطق با ساختارهای پیچیده نظیر کف گنبد‌های نمکی یا در ساختارهایی با شیب‌های متداخل استفاده از کوچ قبل از برانبارش توصیه می‌شود [لینیر، ۱۹۹۹].  | ۹          |
| شکل ۴-۱: مقایسه مقطع ZO (شکل سمت چپ) قبل و بعد از کوچ زمانی (شکل سمت راست). کوچ سبب: (۱) تغییر موقعیت و شیب بازتابنده‌ها و قرارگیری آنها در موقعیت و شیب حقیقی می‌شود (۲) باعث حذف پراش‌ها و سه گانه‌های باز نشده می‌شود [اشپینر، ۲۰۰۷].                                                                                                        | ۱۰         |
| شکل ۱-۲: رکورد چشمه و میدان موج [بعد از روبین، ۲۰۱۰].                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ۱۹         |
| شکل ۲-۲: شرایط تصویرسازی در نقطه بازتاب [بعد از روبین، ۲۰۱۰].                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ۲۳         |
| شکل ۳-۲: کوچ WE از یک چشمه در ۳ گام انجام می‌شود: مقدار عددی میدان موج پایین رونده از منبع محاسبه شود، مقدار عددی میدان موج بالارونده از رکورد چشمه محاسبه شود، شرایط تصویرسازی (ضریب همبستگی در طول t) برای تمام x,z ها اعمال شود (بازگشت در عمق، کوچ یکطرفه، پانل بالایی سمت چپ) و (بازگشت در زمان، کوچ دوطرفه، پانل بالایی سمت راست) [بعد از |            |

- روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۲۵
- شکل ۲-۴: کوچ چشمه یکطرفه، انتشار موج پایین‌رونده از منبع [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۲۸
- شکل ۲-۵: کوچ چشمه یکطرفه. همانند شکل قبل، این شکل برای میدان موج بالارونده متوالی بازسازی شده در عمق‌های  $\Delta z$ ،  $2\Delta z$  و غیره، میباشد [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۲۸
- شکل ۲-۶: کوچ چشمه یکطرفه که شرط تصویرسازی در عمق ۵۰۰۰ متری، با همبستگی میدان موج بالا و پایین‌رونده اعمال شده است [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۳۰
- شکل ۲-۷: روندکار کوچ چشمه یکطرفه. دو میدان موج به صورت رد به رد همبسته میشوند و نتیجه در عمق متناظر، چشمه کوچ داده شده را می‌سازد [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۳۱
- شکل ۲-۸: نمایی از چشمه کوچ داده شده از داده‌های ترکیبی [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۳۳
- شکل ۲-۹: نمایی از کوچ چشمه یکطرفه با استفاده از تمام چشمه‌ها [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۰: : مراحل گام به گام کوچ زمانی کیرشهوف در مقطع دورافت صفر و مدل سرعت کوچ [بعد از روبین، ۲۰۰۳]. ..... ۳۸
- شکل ۲-۱۱: اصول و روندکار وارونسازی شکل کامل موج. مسئله پیشرو از ورداشت‌های ترکیبی چشمه برای یک مدل شبکه‌بندی شده از سرعت‌های مربوط به نمونه آکوستیک محاسبه می‌شود. تابع هزینه اختلاف بین رکوردهای چشمه ترکیبی و مدل‌های واقعی را محدود می‌کند [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۲: هدف نهایی FWI تهیه مدل پارامتری شده گسسته از لایه‌های زیرسطحی است که با داده‌های بدست آمده در مدلسازی پیشرو همخوانی دارد. این مساله به شکل تکراری حل می‌شود [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ..... ۴۲
- شکل ۳-۱: انتشار میدان‌های موج؛ سمت راست میدان موج پایین‌رونده و سمت چپ میدان موج بالارونده [بعد از شوستر، ۲۰۱۰]. ..... ۴۶
- شکل ۳-۲: میدان موج چشمه (بالا)، میدان موج گیرنده (وسط) و همبستگی عرضی میدان موج

- چشمه و گیرنده (پایین) [بعد از کالین و گویتن، ۲۰۰۶]. ۴۷
- شکل ۳-۳: کوچ زمانی معکوس RTM؛ تصاویر لحظه‌ای از میدان‌های موج بالارونده و پایین-  
رونده که در هر ۱ یا ۲ میلی ثانیه محاسبه می‌شوند. [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ۴۸
- شکل ۴-۳: اصول کوچ زمانی معکوس RTM از یک چشمه دوبعدی؛ تصاویر لحظه‌ای میدان موج  
بالارونده و پایین‌رونده که زمان مشابهی دارند تک به تک در یکدیگر ضرب شده‌اند. نتیجه در شکل  
جمع زده شده که تصاویر لحظه‌ای محاسبه شده را تشکیل می‌دهد [بعد از روبین، ۲۰۱۰]. ۵۰
- شکل ۵-۳: انجام برونمایی زمانی و عمقی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود [روبین،  
۲۰۰۳]. ۵۲
- شکل ۶-۳: برونمایی زمانی میدان موج پایین رونده با استفاده از روش عددی تفاضل محدود  
[روبین، ۲۰۰۳]. ۵۳
- شکل ۷-۳: برونمایی میدان موج بالا رونده با استفاده از روش عددی تفاضل محدود [روبین،  
۲۰۰۳]. ۵۴
- شکل ۸-۳: گنبد نمکی و گسل‌های داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A؛ توده پر سرعت گنبد  
نمکی می‌باشد [فلوری، ۲۰۱۲]. ۵۸
- شکل ۹-۳: مقطع کوچ زمانی معکوس بدست آمده از مدل سرعت داده لرزه‌ای مصنوعی  
Sigsbee 2A. ۶۰
- شکل ۱۰-۳: مقطع کوچ زمانی کیرشهوف بدست آمده از مدل سرعت داده لرزه‌ای مصنوعی  
Sigsbee 2A [http://www.pdgm.com]. ۶۱
- شکل ۱۱-۳: الف) مدل سرعت حاصل از قسمتی از توده نمکی موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی  
Sigsbee 2A. ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای  
حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای  
چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد. ۶۲

شکل ۳-۱۲: الف) مدل سرعت گسلی حاصل از قسمتی از داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A .

ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد. .... ۶۴

شکل ۳-۱۳: ساختارهای زمین‌شناسی موجود در داده لرزه‌ای BP-2004. .... ۶۶

شکل ۳-۱۴: الف) مدل سرعت حاصل از توده نمکی سمت راست موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004 . ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد. .... ۶۷

شکل ۳-۱۵: مقطع لرزه‌ای بدست آمده از پردازش به روش کوچ زمانی کیرشهوف که بر گنبد نمکی سمت راست موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004 اعمال شده است [فارمر، ۲۰۰۶]. .... ۶۸

شکل ۳-۱۶: الف) مدل سرعت حاصل از توده نمکی سمت چپ موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004. ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد. .... ۷۰

شکل ۳-۱۷: مقطع لرزه‌ای بدست آمده از روش کوچ زمانی معکوس که بر داده واقعی مرز آلمان و فرانسه اعمال شده است. .... ۷۱

شکل ۳-۱۸: مقطع PSTM بدست آمده از داده برداشت شده در مرز آلمان و فرانسه. .... ۷۲

شکل ۳-۱۹: مقطع لرزه‌ای بدست آمده از روش کوچ زمانی معکوس که بر داده واقعی برداشت شده در غرب ایران اعمال شده است. .... ۷۳

شکل ۳-۲۰: مقطع PSTM تولید شده از داده لرزه‌ای برداشت شده در غرب ایران. .... ۷۳

## فهرست جداول

| عنوان                                            | شماره صفحه |
|--------------------------------------------------|------------|
| جدول ۱-۳: پارامترهای داده مصنوعی Sigsbee 2A      | ۵۷         |
| جدول ۲-۳: پارامترهای داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004 | ۶۵         |

## فهرست علائم و اختصارات

**AVA:** Amplitude Versuse Angle.

**AVO:** Amplitude Versuse Offset.

**CMP :**Common MidPoint.

**CRP:** Common Reflection Point.

**CRS :** Common Reflection Surface.

**CIG:** Common Image Gather.

**CO:** Common Offset.

**CS:** Common Sourse.

**CR:** Common Receiver.

**DMO :** Dip Move-Out.

**FWI:** Full Waveform Inversion.

**FD:** Finite Difference.

**GBM:** Gaussian Beam Migration.

**MF:** Multi Focusing.

**NIP :** Normal Incidence Point.

**NMO:** Normal MoveOut.

**RTM:** Reverse Time Migration.

**RMS:** Root Mean Square.

**S/N:** Signal to Noise ratio.

**WE:** Wavefield Extrapolation.

**ZO :** Zero Offset.

# کلیات

## ۱-۱ مقدمه

هدف نهایی از برداشت داده‌های لرزه‌ای و انجام مراحل پردازش بر روی این داده‌ها بدست آوردن تصاویر هرچه دقیق‌تر و واقعی‌تر از زیر سطح زمین می‌باشد، که در دو حوزه زمان و عمق تحویل مفسر می‌شوند. علاوه بر این سعی می‌گردد تا در کنار تهیه تصاویر از زیر سطح زمین (شکل ۱-۱)، اطلاعات حاصل از دامنه بر حسب دورافت (AVO)<sup>۱</sup>، نشانگرهای لرزه‌ای و مقاطع امپدانس صوتی را نیز فراهم کرد. در ادامه از تمامی این داده‌ها در کنار داده‌های پتروفیزیکی حاصل از چاه‌نگاری، برای تفسیر زمین‌شناسی و تصمیم‌گیری در مورد محل حفاری چاه‌ها، وضعیت مخزن و مطالعاتی از این قبیل استفاده می‌شود. بنابراین با روشن شدن اهمیت تصویرسازی لرزه‌ای زیر سطح در ابتدای بخش بالادستی صنعت نفت، لزوم بدست آوردن تصاویر عمقی یا زمانی با کیفیت هرچه بیشتر و با نسبت سیگنال به نوفه بالاتر و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر، آشکار می‌گردد. روش برانبارش نقطه میانی مشترک (CMP)<sup>۲</sup> همراه با تصحیح برونراند نرمال (NMO)<sup>۳</sup> و تصحیح برونراند شیب (DMO)<sup>۴</sup> برای نیل به چنین هدفی در فاصله‌ای نه چندان دور از شروع فعالیت‌های اکتشاف لرزه‌ای ابداع گردید. ولی این روش در محیط‌هایی که با بازتابنده‌های پر شیب، متداخل و یا تغییرات جانبی سرعت در محیط انتشار موج مواجه هستیم (زمین‌شناسی پیچیده)، قادر به استفاده از تمام داده‌های سهمیم در بازتاب از یک نقطه نمی‌باشد و در نتیجه نسبت سیگنال به نوفه پایین‌تری در تصویر بدست آمده خواهیم داشت. در مواقعی که شیب‌های متضاد با سرعت‌های برانبارش متفاوت در مقطع وجود

---

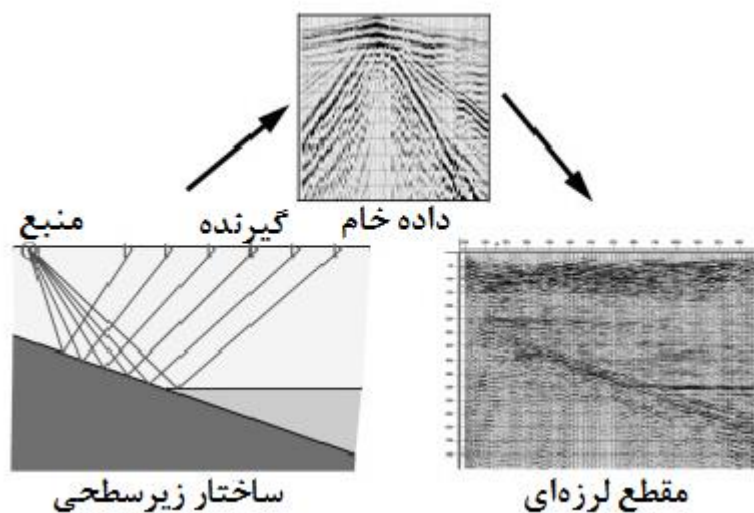
<sup>1</sup> Amplitude versus offset

<sup>2</sup> Common MidPoint stack

<sup>3</sup> Normal MoveOut correction

<sup>4</sup> Dip Move Out correction

دارند، کوچ پس از برانبارش که بر فرض یکسان بودن مقطع برانبارش با مقطع دورافت صفر است عمل می‌کند، جواب قابل قبولی بدست نخواهد داد. در این زمان لازم است که از روش‌های جدیدتری مانند کوچ زمانی معکوس RTM استفاده شود که نشان داده تصویر دقیقتری از ساختارهای زیرسطحی ارائه می‌دهد. در ادامه این فصل پس از اشاره‌ای به برداشت داده‌های لرزه‌ای بازتابی، مرور مختصری بر پردازش مرسوم داده‌های لرزه‌ای بازتابی خواهیم داشت و بعد از آن به تفسیر داده‌های لرزه‌ای و در آخر به ساختار پایان‌نامه خواهیم پرداخت.



شکل ۱-۱: روند کلی در استفاده از لرزه‌نگاری بازتابی. تهیه مقطع لرزه‌ای به کمک ارسال امواج لرزه‌ای به درون زمین، بازتاب آنها از لایه‌ها و آشکارسازی ساختارهای زمین‌شناسی به کمک پردازش داده‌های لرزه‌ای (بعد از خلیل-زاده، ۱۳۹۲).

## ۲-۱ برداشت داده‌های لرزه‌ای بازتابی

داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی در محیط‌های مختلف مانند خشکی، نواحی گذار<sup>۱</sup> و در محیط‌های دریایی کم عمق تا آب‌های بسیار عمیق و با هندسه<sup>۲</sup> (اشکال) مختلف برداشت می‌شوند. تجهیزات لرزه‌نگاری بکار گرفته شده در این مناطق، محدوده وسیعی از دستگاه‌ها و ابزار را شامل می‌شوند که

<sup>۱</sup> Transition zones

<sup>۲</sup> Geometry

اجازه مطالعه زیر سطح زمین را از نزدیک سطح تا عمق چند کیلومتری، میسر می‌سازند. در برداشت‌های بزرگ مقیاس در خشکی، امواج لرزه‌ای معمولاً به وسیله مواد انفجاری و یا ویبراتورهای هیدرولیکی بوجود می‌آیند. میدان موج بازتاب شده، توسط گیرنده‌ها (ژئوفون‌ها)<sup>۱</sup> به عنوان تابعی از زمان، پس از گسیل انرژی لرزه‌ای از چشمه ثبت می‌گردد. مقدار اندازه‌گیری شده، یک یا سه مؤلفه از جابه‌جایی ذره، سرعت یا شتاب است.

در طراحی برداشت‌های لرزه‌ای معمول، میدان موجی که توسط یک چشمه ایجاد می‌شود به وسیله تعداد زیادی گیرنده، ثبت می‌شود. به دلیل ابهام زیاد در مسئله معکوس‌سازی لرزه‌ای<sup>۲</sup>، انجام چندین عدد از این آزمایش‌های ثبت شده با چشمه مشترک، با موقعیت‌های متغیر چشمه و گیرنده، برای جمع‌آوری اطلاعات فراوان و بدست آوردن داده‌هایی هم‌پوشانی شده<sup>۳</sup>، از ساختارهای زیر سطح، لازم به نظر می‌رسد. مجموعه داده‌های دارای هم‌پوشانی بدست آمده، از سری‌های زمانی گسسته برای هر جفت چشمه و گیرنده که معمولاً به آن‌ها ردلرزه<sup>۴</sup> گفته می‌شود، تشکیل شده است و به هر مجموعه از این ردلرزه‌ها با یک هندسه مشخص، برداشت<sup>۵</sup> می‌گویند. معمول‌ترین این مجموعه‌ها که هر کدام در قسمتی از پردازش بکار می‌آیند، برداشت‌های نقطه میانی مشترک (CMP)، دورافت مشترک (CO)<sup>۶</sup>، دورافت صفر (ZO)<sup>۷</sup>، چشمه مشترک (CS)<sup>۸</sup> و گیرنده مشترک (CR)<sup>۹</sup> می‌باشند. طراحی برداشت، همانطور که به هدف اجرای روش لرزه‌ای بستگی دارد، به میزان پیچیدگی ساختار زیر سطح و شرایط محیطی نیز وابسته است. اطلاعات بیشتر در مورد طراحی برداشت لرزه‌ای را می‌توان در [ورمیر<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۲] یافت.

---

<sup>1</sup> Geophones

<sup>2</sup> Seismic inversion

<sup>3</sup> Multi coverage data

<sup>4</sup> Trace

<sup>5</sup> Gather

<sup>6</sup> Common offset

<sup>7</sup> Zero offset

<sup>8</sup> Common source(shot)

<sup>9</sup> Common receiver

<sup>10</sup> Vermeer

## ۳-۱ پردازش داده‌های لرزه‌ای

هدف از پردازش داده‌های لرزه‌ای بدست آوردن تصویر مناسب زیرسطحی است تا تفسیر دقیق‌تری از اطلاعات لرزه‌ای فراهم شود.

### ۱-۳-۱ پیش پردازش<sup>۱</sup>

پیش پردازش اصطلاحاً اولین عملیاتی است که بر روی داده بدست آمده انجام می‌شود تا برای مراحل بعدی تصویرسازی آماده شود. اصلی‌ترین مراحل پیش پردازش شامل [ایلماز<sup>۲</sup>، ۲۰۰۱]:

- تعیین مختصات چشمه و گیرنده‌ها در میان ردلرزه‌ها، و ثبت این مختصات به همراه اطلاعات هندسه‌ی برداشت<sup>۳</sup> در فایلی به نام سرآیند<sup>۴</sup> ردلرزه.
- اعمال فیلتر مناسب روی داده‌ها برای حذف نوفه‌های تصادفی.
- تصحیح استاتیک که بطور معمول بر روی ردلرزه‌ها اعمال می‌شود تا اثر توپوگرافی و تغییرات محلی مربوط به سرعت لایه سطحی را حذف کند. این مرحله فقط بر روی داده‌های بدست آمده از کوهستان اعمال می‌شود.
- اعمال تابع تقویت خودکار برای جبران اثرات ناشی از توزیع هندسی موج کروی.

### ۲-۳-۱ شبیه‌سازی مقطع با دور افت صفر

در طی فرآیند برانبارش به ازای هر برداشت نقطه میانی مشترک<sup>۵</sup> یک ردلرزه با دورافت صفر (ZO) بدست می‌آید. در این مرحله نه تنها حجم داده‌ها در مقایسه با دسته داده‌های دارای هم-پوشانی، کاهش قابل توجهی می‌یابد، بلکه نسبت سیگنال به نوفه (S/N) نیز بطور تقریبی با نسبت

---

<sup>1</sup>Preprocessing

<sup>2</sup>Yilmaz

<sup>3</sup>Field geometry

<sup>4</sup>Header

<sup>5</sup>CMP gather

$\sqrt{N}$  افزایش می‌یابد (N تعداد ردلرزه‌ها در برداشت نقطه میانی مشترک است) [ایلماز، ۲۰۰۱]. علاوه بر این مقطع دورافت صفر، اولین تصویر کلی از ساختارهای زیرسطحی را بدست می‌دهد. در ادامه بطور خلاصه دو روش برای تهیه مقطع دورافت صفر تشریح می‌شود.

### ۱-۲-۳-۱ برانبارش NMO/DMO

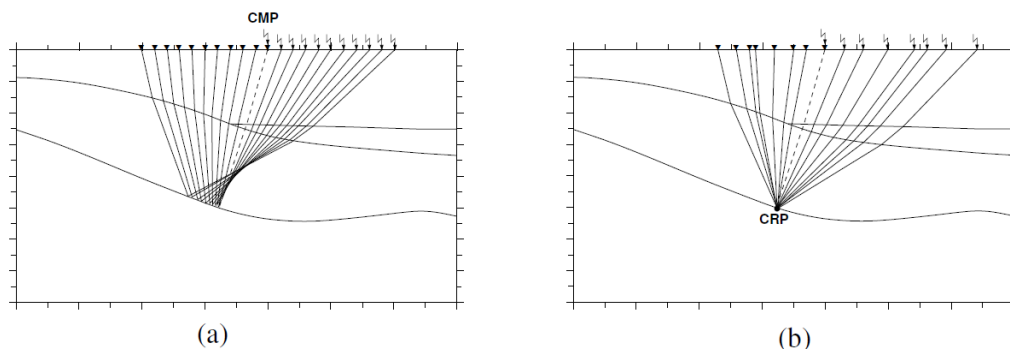
روش برانبارش NMO/DMO روندی است که عموماً بیشترین استفاده را در تهیه مقطع ZO دارد. بعد از برداشت و ثبت اطلاعات، داده‌ها از حالت برداشت چشمه مشترک به صورت برداشت نقطه میانی مشترک بین موقعیت چشمه و گیرنده دسته‌بندی می‌شوند. در درون این برداشت‌های نقطه میانی مشترک ردلرزه‌ها با توجه به دورافتشان دسته‌بندی می‌شوند. با نگاهی به یکی از این گروه‌های لرزه‌نگاشت نقطه میانی مشترک درمی‌یابیم که وقایع بازتابی رفتاری شبیه به یک هذلولی از خود نشان می‌دهند. هذلولی بازتاب در نتیجه اثری است که دورافت‌های بزرگ بر انتشار موج در فاصله‌های زیاد بین چشمه و گیرنده بر جای می‌گذارند. اختلاف زمان سیر ( $\Delta t_{NMO}$ ) بین زمان سیر  $t_h$  برای یک دورافت مشخص و زمان سیر با دور افت صفر  $t_0$ ، برونراند نرمال<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. اثر دورافت را می‌توان با دانستن سرعت NMO و در طی فرآیندی به نام تصحیح برونراند نرمال، تصحیح و رخدادهای بازتابی را در یک خط افقی قرار داد. در مناطق با پیچیدگی‌های ساختاری یک برداشت نقطه میانی مشترک حاوی اطلاعاتی از نقاط بازتابی متفاوتی در عمق است، در این صورت متحمل مسئله‌ای به نام پراکندگی نقطه‌ای بازتاب<sup>۲</sup> می‌شود. این مسئله موجب بروز خطا در نتایج آنالیز سرعت و در مقیاس کوچکتر، در نتیجه برانبارش می‌شود. اصولاً این اثر را می‌توان با اعمال تصحیح برونراند شیب<sup>۳</sup> که نقطه میانی مشترک را به نقطه‌ای بازتاب مشترک<sup>۴</sup> تبدیل می‌کند، جبران کرد (شکل ۱-۲).

<sup>۱</sup>Normal moveout

<sup>۲</sup>Reflection point dispersal

<sup>۳</sup>Dip-moveout

<sup>۴</sup>Common reflection point(CRP)



شکل ۱-۲: مقایسه وضعیت (a) نقطه میانی مشترک (CMP) و (b) نقطه‌ی بازتاب مشترک (CRP). برای لایه‌های ناهمگن یا لایه‌ای با سرعت‌های جانبی متغیر، در یک دسته CMP پراکندگی نقطه‌ی بازتاب مشاهده می‌شود یعنی بازتاب‌ها از یک نقطه‌ی یکسان نیستند [اشپینر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷].

وقایع بازتابی متعلق به یک نقطه‌ی بازتاب مشترک در روی منحنی به نام خط سیر نقطه بازتاب مشترک<sup>۲</sup> و در حجم نقطه میانی، دورافت و زمان قرار می‌گیرند. در شرایط ایده‌آل فقط اطلاعات در امتداد خط سیر نقطه بازتاب مشترک CRP باید جمع بسته شود. این حالت درست مانند موقعیتی است که فقط اطلاعات مربوط به یک نقطه‌ی عمقی یکسان، در نظر گرفته می‌شود. در عمل تعیین خط سیر نقطه میانی مشترک CRP بدون در اختیار داشتن سرعت و موقعیت دقیق بازتاب‌ها امکان‌پذیر نیست و در این حالت لازم است که از تصحیح برونراند شیب (یک سطح برانبارش شامل خط سیر CRP) نیز به عنوان یک عملگر برانبارش استفاده شود [ایلماز، ۲۰۰۱].

### ۱-۳-۳ کوچ<sup>۳</sup>

کوچ معمولاً آخرین مرحله در تصویرسازی است. بطور کلی کوچ به دو صورت کوچ زمانی و کوچ عمقی انجام می‌گیرد. تصاویر لرزه‌ای بدست آمده از این دو روش متفاوت است. تفاوت این دو تکنیک تنها در حوزه‌ای که منجر به ساخت تصویر می‌شود نیست. در کوچ زمانی، محیط بطور موضعی یک-بعدی فرض می‌شود و بنابراین در محیط‌هایی با تغییرات جانبی شدید، ناکارآمد می‌شود. اگرچه حوزه

<sup>1</sup>Spinner

<sup>2</sup>Common Reflection Point(CRP) trajectory

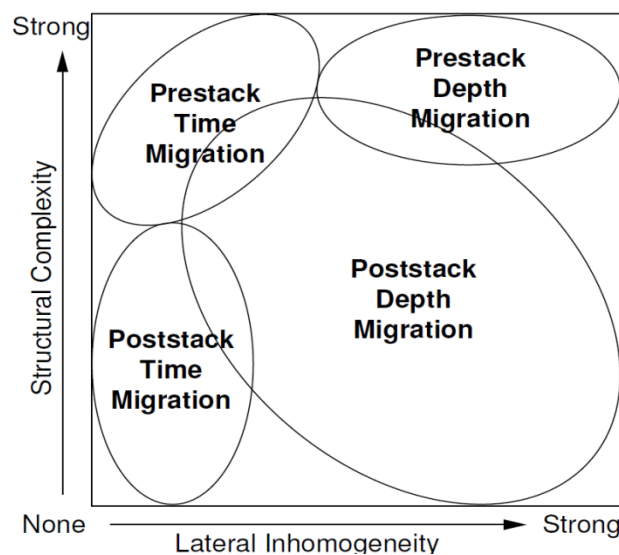
<sup>3</sup>Migration

عمقی برای تصویرسازی ساختارهای زمین‌شناسی مناسب‌تر بنظر می‌رسد، اما کوچ زمانی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر بدان علت است که ساختن مدل سرعت ساده‌تر بوده و خطا در مدل سرعت تأثیر کمتری بر نتیجه کوچ و بویژه بر روی دامنه‌ها دارد [اشپینر، ۲۰۰۷]. مقطع کوچ زمانی را می‌توان براحتی با مقطع زمانی قبل از برانبارش مقایسه کرد. این امر یکی از مزیت‌های کوچ زمانی است در حالیکه در کوچ عمقی مقطع بدست آمده تطبیق قابل قبولی را نسبت به ساختارهای زیرسطحی از خود به نمایش می‌گذارد. برای هر دو کوچ ذکر شده در بالا در اختیار داشتن اطلاعات دقیق سرعت ضروری است. در کوچ زمانی از سرعت  $RMS^1$  و کوچ عمقی از اختلاف سرعت‌های بازه‌ای که میانگین سرعت‌های واقعی زمین است، استفاده می‌شود. کوچ زمانی را هم، می‌توان مانند کوچ عمقی بر مقطع برانبارش دورافت صفر (کوچ پس از برانبارش<sup>۲</sup>) یا بر تمامی دسته داده‌های دارای هم‌پوشانی (کوچ قبل از برانبارش) اعمال کرد. در کوچ قبل از برانبارش، فرآیند کوچ بطور جداگانه بر روی هر شبکه دورافت در جاییکه دورافت‌ها در یک محدوده‌ی معین با هم ترکیب شده تا کافی بودن تعداد ردلرزه‌ها تضمین شود، اعمال می‌شود. فرآیند کوچ بعد از برانبارش سریعتر بوده و تصویر با کیفیت بالاتر که ناشی از بهبود نسبت سیگنال به نوفه  $S/N$  در مقایسه با داده‌های ورودی می‌باشد، را بدست می‌دهد. البته این تکنیک در مناطق با ساختارهای پیچیده کارایی چندانی ندارد [ایلماز، ۲۰۰۱]. محدوده‌ی عملکرد کوچ قبل و بعد از برانبارش در حوزه زمان و عمق در (شکل ۱-۳) نشان داده شده است.

---

<sup>1</sup>Root-Mean-Square

<sup>2</sup>Poststack



شکل ۳-۱: محدوده کارکرد کوچ قبل و بعد از برانبارش عمقی و زمانی. کوچ زمانی برای محیط‌های با تغییرات ملایم سرعت مناسب‌تر است و در مناطق با ناهمگونی جانبی شدید نیازمند به اعمال کوچ عمقی می‌باشد. در مناطق با ساختارهای پیچیده نظیر کف گنبدهای نمکی یا در ساختارهایی با شیب‌های متداخل استفاده از کوچ قبل از برانبارش توصیه می‌شود [لینیر<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹].

کوچ قبل از برانبارش حاوی اطلاعات تمامی دورافت‌ها است و به همین دلیل فقط در کوچ قبل از برانبارش می‌توان کیفیت مدل سرعت را با تصاویر مجزایی که در هر دورافت بدست می‌آید، بررسی کرد. با بیرون کشیدن ردلرزه‌های مربوط به یک وضعیت جانبی (افقی) مشترک و به نمایش در آوردن آنها به صورت تابعی از دورافت، ورداشت تصویر مشترک<sup>۲</sup> حاصل می‌شود. اگر مدل سرعت بکار رفته در کوچ با دسته داده‌ها سازگار باشد، تمامی مقاطع دورافت مشترک از لحاظ جنبشی<sup>۳</sup> هم‌ارزند و رخدادها در ورداشت تصویر مشترک صاف<sup>۴</sup> دیده می‌شوند. در یک برونراند مثبت، یعنی تصاویر مربوط به دورافت‌های دور در مقایسه با دورافت‌های نزدیکتر در زمان سیرهای کوچک‌تری ظاهر می‌شوند، که این امر نشان دهنده‌ی این است که سرعت کوچ، اندک در نظر گرفته شده است و برعکس. بنابراین می‌توان معیاری برای تعیین درستی مدل سرعت و بروز کردن آن ایجاد کرد [اشپینر، ۲۰۰۷].

(شکل ۴-۱) نتیجه اعمال کوچ در یک مقطع مصنوعی را نشان می‌دهد. در شکل سمت چپ

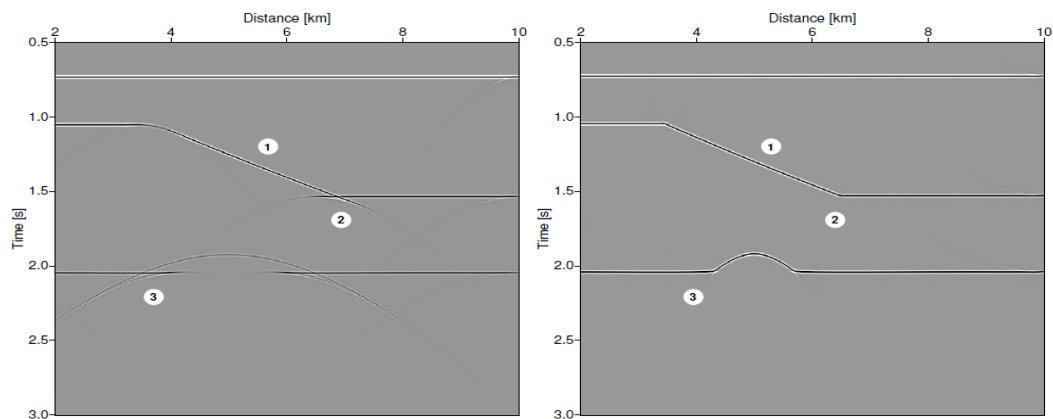
<sup>1</sup>Liner

<sup>2</sup>Common-image gather(CIG)

<sup>3</sup>Kinematically

<sup>4</sup>Flat

مقطع دورافت صفر و در شکل سمت راست مقطع کوچ داده شده‌ی آن نشان داده شده است. در این مثال دیده می‌شود که در مقطع کوچ داده شده، تصویر بازتابنده با شیب، انحنا و موقعیت صحیح به نمایش در می‌آید و پراش‌ها در محل شکستگی متمرکز و ناپدید می‌شوند.



شکل ۱-۴: مقایسه مقطع ZO (شکل سمت چپ) قبل و بعد از کوچ زمانی (شکل سمت راست). کوچ سبب: (۱) تغییر موقعیت و شیب بازتابنده‌ها و قرارگیری آنها در موقعیت و شیب حقیقی می‌شود (۲) باعث حذف پراش‌ها و سه‌گانه‌های باز نشده می‌شود [اشپینر، ۲۰۰۷].

با در نظر گرفتن جنبه‌های جنبشی (بر مبنای زمان سیر) و همچنین دینامیکی (بر مبنای دامنه‌های اندازه‌گیری شده‌ی سیگنال)، فرآیند کوچ انجام گرفته را کوچ با دامنه واقعی می‌نامیم. برای این منظور، اثر هندسی زمین در طی الگوریتم کوچ با اعمال تابع وزنی مناسب جبران می‌شود. دامنه‌هایی که اثر هندسی زمین از آنها حذف شده‌اند، دامنه واقعی نامیده می‌شوند. اگر تمامی دسته داده‌های دارای هم‌پوشانی بوسیله‌ی کوچ با دامنه واقعی، کوچ داده شوند، مشخصه‌های بیشتری از بازتابنده‌ها را می‌توان با استفاده از آنالیز  $AVO^1/AVA^2$  بدست آورد. واضح است که اگر مقطع شبیه‌سازی شده دورافت صفر با اشکال مواجه باشد، اطلاعات مربوط به دورافت‌های دور را از دست خواهیم داد [کیناست<sup>۳</sup>، ۲۰۰۷].

<sup>1</sup>Amplitude versus offset

<sup>2</sup>Amplitude versus angle

<sup>3</sup>Kienast

## ۴-۱ تفسیر داده‌های لرزه‌ای

هدف تفسیر مقطع لرزه‌ای تعیین ساختارهای با اهمیت زمین‌شناسی از داده‌های لرزه‌ای است. در فرآیند تفسیر، آنالیزهای ویژه‌ای صورت می‌گیرد که در پی آن موقعیت مخزن نفت، گاز یا ذخایر ژئوترمال شناخته می‌شود. این آنالیزها شامل تفسیر ساختاری<sup>۱</sup> و چینه‌شناسی<sup>۲</sup> است. در تفسیر ساختاری، هندسه‌ی بازتابنده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و پتانسیل وجود مخزن در این رخدادهای ارزیابی می‌شود. تفسیر چینه‌شناسی تعیین کننده واحد چینه‌شناسی زمانی<sup>۳</sup> بازتابنده‌ها است. داده‌های ورودی در هر دو تکنیک، مقطع کوچ به همراه مقطع همتای کوچ داده نشده آن است. در صورت استفاده از کوچ زمانی باید آن را به کوچ عمقی تبدیل کرد. البته اطلاعات تکمیلی دیگری نیز می‌تواند به تفسیر دقیق‌تر کمک کند از قبیل:

- اطلاعات مربوط به سایر روش‌های ژئوفیزیکی نظیر گرانی‌سنجی.
- اطلاعات کمکی حاصل از معکوس‌سازی AVO/AVA.
- داده‌های پتروفیزیکی.

## ۵-۱ ساختار پایان‌نامه

بعد از مقدماتی گذرا در فصل اول، پیرامون برداشت و انواع روش‌های پردازش داده‌های لرزه‌ای و تفسیر داده‌های لرزه‌ای، در فصل دوم به تصویرسازی داده‌های لرزه‌ای و انواع آن خواهیم پرداخت، در فصل سوم در مورد پردازش مربوطه در این پایان‌نامه یعنی کوچ زمانی معکوس و اعمال پردازش فوق بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی بحث خواهیم کرد و در فصل آخر در مورد نتایج حاصل از این پایان‌نامه صحبت خواهیم کرد.

---

<sup>1</sup>Structural analysis

<sup>2</sup>Stratigraphical analysis

<sup>3</sup>Chonostratigraphical



## تصویرسازی داده‌های لرزه‌ای

## ۱-۲ مقدمه

هدف اصلی تصویرسازی لرزه‌ای بازتابی، بدست آوردن اطلاعات جزئی از ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی به شکل یک تصویر لرزه‌ای است. چنین تصویری را می‌توان از طریق اعمال فرایند کوچ روی داده‌های لرزه‌ای پردازش شده بدست آورد. این فرایند را هم می‌توان روی داده‌ی برانبارش شده (کوچ پس از برانبارش) و هم روی داده‌ی پیش از برانبارش (کوچ پیش از برانبارش) اعمال کرد. پیش از تصویرسازی لرزه‌ای، داده‌های خام برداشت شده باید برای مراحل بعدی آماده، یا به عبارتی پیش‌پردازش شوند. ابتدا ردلرزه‌های معیوب حذف می‌شوند و هندسه برداشت داده‌ها در سر زمین، مثلاً مختصات چشمه‌ها و گیرنده‌ها، برای سربرگ<sup>۱</sup> ردلرزه‌ها مشخص و معلوم می‌شوند. به کمک اعمال فیلترهای مختلف، نوفه همدوس<sup>۲</sup> یا نوفه‌هایی که خارج از محدوده فرکانس در نظر گرفته شده هستند، کاهش می‌یابند. توابع تقویت خودکار<sup>۳</sup> هم، برای جبران واگرایی<sup>۴</sup> کروی<sup>۴</sup> و فرآیند جذب انرژی و کاهیدگی<sup>۵</sup> امواج، با اهداف نمایی، بکار می‌روند. سپس نوبت به واهمامیخت<sup>۶</sup> می‌رسد که می‌توان آن را نوعی فیلتر معکوس برای حذف اثرات موج منبع دانست. در نتیجه‌ی انجام این فرآیند طول پالس لرزه‌ای کاهش یافته و به فاز صفر تبدیل می‌شود، که وضوح عمودی یا زمانی را در پی خواهد داشت. برای توضیحات بیشتر ریاضی و روش‌های مختلف واهمامیخت، می‌توانید به بوتکوس<sup>۷</sup>، [۲۰۰۰] مراجعه نمایید. دسته‌بندی کردن داده‌ها برحسب برداشت نقطه میانی مشترک، انجام تحلیل سرعت<sup>۸</sup>

---

<sup>۱</sup> - Header

<sup>۲</sup> - Coherent noise

<sup>۳</sup> - Automatic gain functions

<sup>۴</sup> - Spherical divergence

<sup>۵</sup> - Energy absorption and attenuation

<sup>۶</sup> Deconvolution

<sup>۷</sup> Buttkus

<sup>۸</sup> Velocity analysis

و بدست آوردن میدان سرعت برون‌راند نرمال و استفاده از آن در تصحیح برون‌راند نرمال، اعمال تصحیح برون‌راند شیب، اعمال استاتیک باقیمانده<sup>۱</sup> که مرتبط با تغییرات کوچک مقیاس سرعت نزدیک به سطح است، برانبارش ردلرزه‌ها در ورداشت‌های نقطه میانی مشترک و بدست آوردن مقطع برانبارش شده در حوزه زمان، از برجسته‌ترین مراحل روش مرسوم پردازش می‌باشند. مراحل ذکر شده، نوفه‌های همدوس و تصادفی و حجم داده‌ها را برای پردازش‌های بعدی، کاهش می‌دهند. از سرعت‌های برانبارش حاصل از تحلیل سرعت نیز می‌توان به عنوان پایه‌ای برای ساخت مدل سرعت مورد نیاز کوچ<sup>۲</sup> به منظور بدست آوردن تصویر واقعی از ساختارهای زیرسطحی، استفاده کرد. در این فصل به انواع مختلف روش‌های تصویرسازی لرزه‌ای که بر پایه‌ی تئوری پرتو و حل معادله موج می‌باشند، خواهیم پرداخت.

## ۲-۲ تصویرسازی بر مبنای تئوری پرتو

در حالت کلی، تصویرسازی لرزه‌ای را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم‌بندی کرد:

- تصویرسازی بر پایه استفاده از تئوری پرتو.
- تصویرسازی بر پایه حل معادله موج.

در این بخش به روش‌های تصویرسازی مبتنی بر تئوری پرتو پرداخته شده و در انتهای فصل به نوع دیگر تصویرسازی پرداخته می‌شود.

تکنیک‌های موجود در تئوری پرتو ابزاری قدرتمند و تکرارپذیر در بررسی مسائل پیشرو و معکوس لرزه‌ای است. تئوری پرتو دو مزیت عمده دارد: این تکنیک بینش شهودی و فیزیکی را در مورد پدیده انتشار موج فراهم می‌کند و کارایی محاسباتی بیشتری نسبت به حل‌های مستقیم عددی معادله‌ی موج دارد. هرچند این مسئله نیز باید ذکر شود که این روش نمی‌تواند کل میدان موج را توصیف کند

---

<sup>1</sup> Residual static

<sup>2</sup> Migration

و در برخورد با مناطق کانونی<sup>۱</sup>، که در اصطلاح علمی به آن کائوستیک<sup>۲</sup> گفته می‌شود، با اشکالاتی مواجه می‌شود. برخی از مبانی اصلی تئوری پرتو در زمینه الاستودینامیک از مدت‌ها قبل در فیزیک شناخته شده بود و یکی از اولین انتشارات حاوی توصیف ریاضی این تئوری توسط لیونبرگ<sup>۳</sup> [۱۹۶۶] انجام گرفت. پس از این مقالات و کتاب‌های فراوانی در مورد جنبه‌های مهم و کاربردی تئوری پرتو انتشار یافت. که در این میان می‌توان به هانیگا<sup>۴</sup> [۱۹۸۴]، کراتسوف و اورلوف<sup>۵</sup> [۱۹۹۰] و پوپوف<sup>۶</sup> [۱۹۹۶] را اشاره کرد. جامع‌ترین توصیف تکنیک پرتو را می‌توان در چرونی<sup>۷</sup> [۲۰۰۱] پیدا کرد.

تئوری پرتو فقط یک تقریب است و تنها وقتی معتبر است که فرکانس امواج به قدر کفایت بالا باشد. این جمله قدری گیج کننده است زیرا در اکتشافات ژئوفیزیکی معمولاً با فرکانس‌های بین ۱۰-۱۰۰ سروکار داریم. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که اصطلاح "فرکانس بالا" اشاره به مقدار مطلق آن ندارد. آنچه که باید در نظر داشت، رابطه‌ی بین طول موج‌های (یا عدد موج) وابسته به فرکانس در داده‌ها نسبت به ابعاد هندسی محیط انتشار موج (بطور مثال، ضخامت لایه‌ها یا شعاع انحنای بازتاب‌ها) است. برای آنکه شرط فرکانس بالا در معادلات صادق باشد، تنها لازم است که ابعاد محل انتشار موج تنها چندین برابر طول موج مورد نظر باشد. هرچند اگر شرایط فرکانس بالا برقرار نباشد، آسیب جدی به تئوری وارد نمی‌شود، ولی نارسایی در تئوری پرتو منجر به عدم تخمین درست در دامنه‌ها و افزایش خطا در موقعیت بازتاب‌ها یا وقایع بازتابی می‌شود.

حال بطور خلاصه، به دو نوع از روش‌هایی که بر مبنای تئوری پرتو عمل می‌کنند، اشاره می‌کنیم، که می‌توان به روش کوچ اشعه گاوسی و روش تمرکز چندگانه اشاره کرد.

---

<sup>1</sup>Focal region

<sup>2</sup>Caustics

<sup>3</sup> Luneburg

<sup>4</sup> Haniga

<sup>5</sup> Kravtsov and Orlov

<sup>6</sup>Popov

<sup>7</sup> Cervený

## ۲-۱-۲ کوچ اشعه گاوسی

روش کوچ اشعه گاوسی<sup>۱</sup> (GBM) به عنوان یک روش کوچ عمقی کارآمد و مؤثر، که بر پایه تئوری پرتو عمل می‌کند، در کوچ داده‌های با کیفیت پایین و زمین‌شناسی پیچیده شناخته می‌شود. هیل [۲۰۰۱] کوچ پرتو گاوسی را به عنوان یکی از روش‌هایی که انتشار موج را به صورت پیوسته با استفاده از تعیین پارامترهای میدان موج در نظر می‌گیرد معرفی کرد. تفاوت این روش در مقایسه با سایر تکنیک‌های کوچ در این است که این روش، اعداد مختلطی از زمان و دامنه را برای تصویرسازی استفاده می‌کند. این اعداد مختلط، در واقع معادل همان مقادیر زمان سیر هستند که در روش‌های عادی کوچ در جدول زمان سیر برای انجام فرایند کوچ استفاده می‌شوند. اشعه گاوسی توصیفی از انتشار موج لرزه‌ای است که می‌تواند وقتی که تغییرات جانبی سرعت لرزه‌ای وجود دارد مفید باشد. ادامه فروسو اشعه گاوسی قادر به محاسبه معادله انتشار موج لرزه‌ای است، در حالیکه توصیفی از انتشار مسیر پرتو تفسیری را حفظ می‌کند. کوچ اشعه گاوسی با تغییرات جانبی سرعت سازگار است و همچنین می‌تواند بازتابنده‌هایی با شیب تند را نیز به تصویر کشد. برخلاف دیگر روش‌های مسیر پرتو، کوچ اشعه گاوسی رفتار عادی تضمین شده در سایه‌ها و سطح شعاعی منحنی دارد. تصاویر تولید شده توسط کوچ اشعه گاوسی معمولاً در رابطه با تغییرات در پارامترهای اشعه پایا هستند. علاوه بر بهره‌گیری از مزایای رفتار منظم اشعه‌های گاوسی، روش کوچ اخیر تراکم اشعه را تعیین می‌کند. تعداد اشعه‌های مورد نیاز با روش تجزیه کمتر از تعداد مورد نیاز برای ساخت چشمه نقطه‌ای توابع گرین اشعه‌های گاوسی از پرتوهای ردیابی شده از همه مکان‌های نقطه میانی مشترک است. اولین مرحله در مدل‌سازی پیشرو اشعه‌های گاوسی پیدا کردن مجموعه‌ای از اشعه‌هاست که برای بازتولید میدان موج، که منبع انرژی را ترک می‌کند، جمع بسته خواهند شد. انتشار هر اشعه به گیرنده و جمع بخشی از اشعه‌های مجزا، داده‌های لرزه‌ای مصنوعی را تولید می‌کند.

---

<sup>1</sup> Gaussian beam migration

## ۲-۲-۲ روش‌های تمرکز چندگانه

در مناطق با ساختار پیچیده که برای تصویرسازی درست زیرسطحی نیاز به کوچ وجود دارد، مدل سرعت مورد نیاز از پارامترهای تصویرسازی زمانی بدست می‌آید. به همین دلیل در دو دهه‌ی اخیر تحقیقات فراوانی در جهت افزایش کیفیت تصویرسازی زمانی انجام شده است. روش‌های تمرکز چندگانه ( $MF^1$ ) باعث افزایش کیفیت تصویرسازی زمانی شده‌اند. در این روش‌ها ردلرزه‌هایی که با برانبارش منجر به تولید یک ردلرزه در مقطع دورافت صفر می‌شوند، الزاماً متعلق به یک برداشت نقطه میانی مشترک نیستند؛ اما چشمه-گیرنده‌ی متعلق به هر ردلرزه در بازه‌ای مشخص در محدوده‌ی نقطه‌ی مرکزی هستند. مقدار این محدوده با اولین زون فرنل مشخص می‌شود<sup>۱</sup> برکوویچ و همکاران، ۲۰۱۲]. یکی از روش‌هایی که بر مبنای تمرکز چندگانه عمل می‌کند و توسعه‌ی قابل ملاحظه‌ای یافته است، روش سطح بازتاب مشترک است. هوبرال و همکاران در سال ۱۹۹۶ مفهوم روش سطح بازتاب مشترک ( $CRS^2$ ) را معرفی نمودند. برانبارش سطح بازتاب مشترک مستقل از مدل سرعت عمل کرده و با توجه به برانبارش صفحه‌ای، نسبت سیگنال به نوفه و پیوستگی رخدادها در مقطع نهایی، بسیار بیشتر از روش‌های پردازشی متداول است. این روش در نواحی دارای پراش تنها رخداد با همدوسی بالاتر را در نظر می‌گیرد. روش بهینه سطح بازتاب مشترک برای رفع این مشکل ارائه شد که تنها تعداد معدودی از شیب‌های متداخل را در نظر می‌گیرد [من، ۱۹۹۹]. برای محاسبه عملگر برانبارش نیاز به سه نشانگر است که عبارت‌اند از زاویه ورود  $\alpha$ ، شعاع انحنای موج عمود  $R_N$  و شعاع انحنای موج عمود در نقطه ورود  $R_{NIP}^3$ .

---

<sup>1</sup>- Multifocusing

<sup>2</sup>- Common Reflection Surface

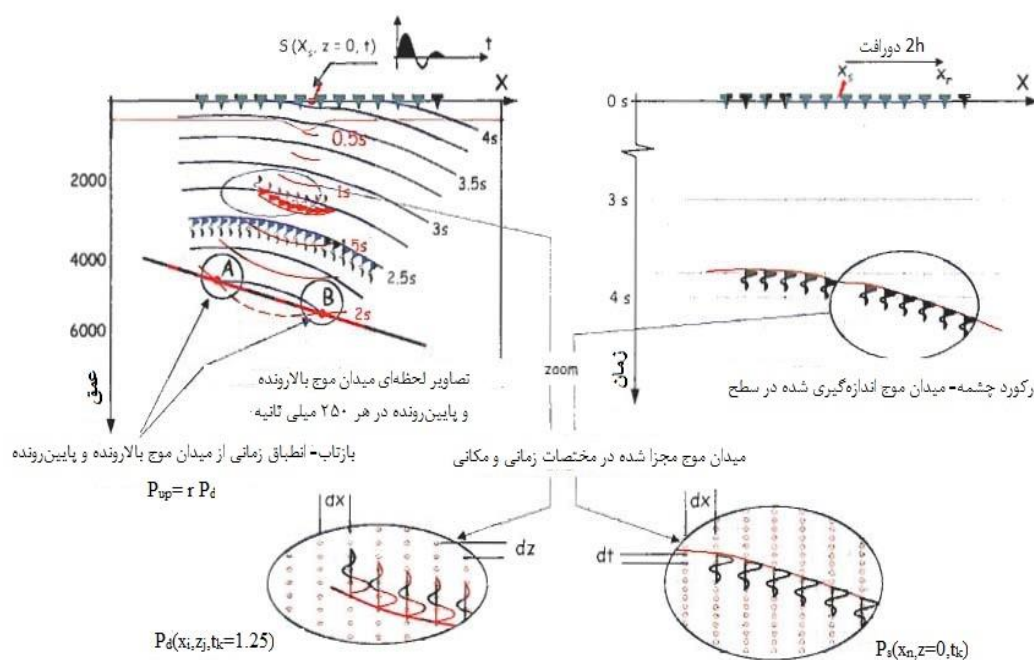
<sup>3</sup>- Normal Incidence Point

## ۳-۲ تصویرسازی بر مبنای حل معادله موج

این روش‌ها به دو دسته‌ی حل معادله موج یک‌طرفه و حل معادله موج دوطرفه تقسیم‌بندی می‌شوند، که در این بخش به طور کامل به این روش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۱-۳-۲ روش‌های حل معادله موج یک‌طرفه

تکنیک‌های تصویرسازی<sup>۱</sup> مبتنی بر برونمایی موج<sup>۲</sup> توسط مقاله‌ای که کلیبربوت<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۱ با عنوان "پیش به سوی یک نظریه متحد برای به نقشه در آوردن بازتابنده" ارائه داد، شروع شد. او در این مقاله اصل مشهور خود در مورد تصویرسازی را به این صورت بیان کرد: بازتابنده‌ها در نقاطی از زیر سطح قرار دارند، که اولین رسید موج پایین‌رونده با موج بالارونده از لحاظ زمانی منطبق گردد.



شکل ۱-۲: رکورد چشمه و میدان موج [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

<sup>1</sup> imaging

<sup>2</sup> Wave extrapolation

<sup>3</sup> claubout

در قسمت بالا و سمت چپ شکل ۱-۲، میدان موج پایین‌رونده<sup>۱</sup> که توسط چشمه‌ای واقع در محل  $X_s$  ایجاد شده، با رنگ قرمز نمایش داده شده است. انتشار این میدان موج در زمان صفر و با اثر چشمه  $S(t)$  آغاز شده است. میدان موج، مقدار آشفتگی در فشار محیط و یا سرعت ذره‌ای است که مستقیماً توسط چشمه در هر موقعیتی  $(x,z)$  در زیر سطح و در زمان  $t$  ایجاد می‌شود. این موقعیت به صورت  $P_d(x,z,t)$  نشان داده شده است.

میدان موج در شکل ۱-۲ در زمان‌های مختلف  $P_d(x,z,t=\text{constant})$  نشان داده شده است. به منظور ساده‌تر شدن شکل، شکل میدان موج تنها به جبهه‌های موج محدود شده است. با این حال برای زمان  $t=1.25s$  شکل کامل میدان موج در سمت چپ و در پایین آورده شده است که به شکل  $(P_d(x,z,t=1.25))$  نشان داده می‌شود. در این مثال ساده، تنها محدوده بالای جبهه موج که با توجه به طول سیگنال تعیین می‌شود، دچار ارتعاش شده است، که پس از گذراندن ارتعاش الاستیک، به حالت تعادل برخواهد گشت [اروبین، ۲۰۱۰].

هنگامی که میدان موج پایین‌رونده به مرز امپدانس می‌رسد، بخشی از انرژی بازتاب می‌یابد که همین بخش باعث ایجاد میدان موج بالارونده<sup>۲</sup> مربوط به آن می‌شود که در شکل با رنگ آبی و به صورت  $P_{up}(x,z,t)$  نشان داده شده است. همچنین برای میدان موج پایین‌رونده، تصاویر لحظه‌ای با فواصل زمانی ۲۵۰ میلی ثانیه که تنها به جبهه‌های موج محدود است، مشخص شده است. همانطور که قبلاً اشاره گردید، میدان‌های موج، محدود به پهنای باند فرکانس ذاتی سیگنال لرزه‌ای می‌باشند. برای نشان دادن این مطلب، ما تک بازتابنده‌ای را زیر سطح زمین فرض کرده‌ایم که موج بازتابی، یا به عبارتی میدان موج بالارونده را کاملاً تولید می‌کند. دامنه‌ها در تصویر فوق و تصویرهای بعدی که بر مبنای همین مدل هستند، به صورت فرضی در نظر گرفته شده‌اند. در هر نقطه از محدوده زیر زمین که سهمی در میدان موج بالارونده دارد، بازتاب رخ خواهد داد. میدان موج بالارونده که انتشار یافته به

<sup>1</sup> down going wavefield

<sup>2</sup> Up going wavefield

وسیله ژئوفون‌ها و هیدروفون‌ها در سطح، به عنوان تابعی از زمان ثبت می‌گردد. خروجی تابع زمانی فوق، رکورد چشمه<sup>۱</sup> است که به صورت  $P_{up}(X_r, z=0, t)$  نشان داده شده است. اصل تصویرسازی در شکل ۱-۲ بیان می‌کند که بازتابنده در زیر زمین در محلی قرار دارد که میدان موج پایین‌رونده (یا تابش) و بالارونده (یا بازتابی) در محور زمان و مکان، دچار انطباق زمانی شوند، همچنین بیان می‌دارد که ضریب بازتاب<sup>۲</sup> محلی، نسبت بین دامنه‌های میدان موج بالارونده و میدان موج پایین‌رونده می‌باشد.

فرایند تصویرسازی بر مبنای حل معادله موج به زبان ساده به شکل زیر است:

- ابتدا مقدار عددی میدان موج پایین‌رونده  $P_d(X, z, t)$  در هر نقطه از زیر سطح زمین محاسبه می‌شود.

- سپس میدان موج بالارونده کامل  $P_{up}(X, z, t)$  را در حوزه زمان و در هر نقطه از زیر سطح زمین، بر اساس اندازه عددی آن در سطح زمین، یعنی  $P_{up}(X_r, z=0, t)$  بازسازی می‌شود.

- در انتها، اصل تصویرسازی، یعنی بدست آوردن بازتابنده‌هایی که در هر نقطه زیر زمین، که در آن نقاط دو میدان موج انطباق زمانی دارند، اعمال می‌شود.

مقدار عددی میدان موج پایین‌رونده در هر زمان و مکان زیر سطح زمین، با مشخص بودن سیگنال چشمه و مدل سرعت، با روش حل پیشرو محاسبه می‌شود. پیشینه میدان موج بالارونده و بازسازی آن کار دشواری نیست و مقدار عددی آن در سطح در قالب رکورد چشمه مشخص است. رکورد چشمه در بالا و سمت راست شکل ۱-۲ به صورت  $P_{up}(X_r, z=0, t)$  نشان داده شده و نشان دهنده این است که، مقدار عددی میدان موج بالارونده در فاصله  $X_r$  و در سطح یعنی  $z=0$  ثبت شده است و تابعی از انتشار موج و زمان ثبت  $t$  است. این امر شرایط مرزی<sup>۳</sup> مسئله برونمایی را تشکیل می‌دهد که بدین وسیله میدان موج بالارونده  $P_{up}$  در هر موقعیت زمانی و مکانی در زیر سطح بازیابی می‌شود. این امر بسیار

<sup>1</sup> Shot record

<sup>2</sup> Reflection coefficient

<sup>3</sup> Boundary conditions

شبيه به قرار دادن اثر چشمه به عنوان شرط مرزی برای محاسبه میدان موج پایین‌رونده است. میدان-های موج پایین‌رونده و بالارونده با استفاده از اطلاعات از پیش تعیین شده و یا اطلاعات بدست آمده از سطح، محاسبه می‌شوند. به روش فوق برونمایی میدان موج<sup>۱</sup> یا WE می‌گویند، بدیهی است که برونمایی میدان موج بالارونده و میدان موج پایین‌رونده هنگامی امکان‌پذیر است که میدان‌های سرعت و انیزوتروپی (ناهمسانگردی) در زیر سطح مشخص باشند [روبین، ۲۰۱۰].

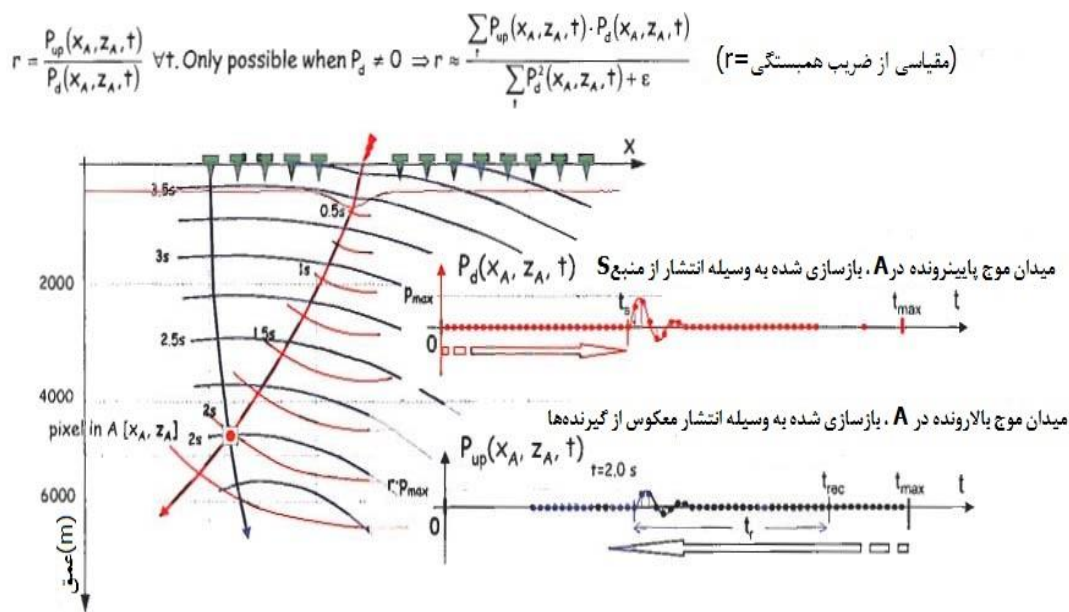
بازه‌های زمانی و مکانی شبکه رقومی شده یعنی  $\Delta t$ ،  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  و  $\Delta z$  نشان دهنده دقت انتشار امواج شبیه‌سازی شده است و برخی از این پارامترها، هنگامی که داده‌ها برداشت می‌شوند ثابت هستند. به عنوان مثال  $\Delta x$  مربوط به رکورد چشمه در واقع همان فاصله ردلرزه‌ها در میدان است (که معمولاً در بازه ۱۲/۵ تا ۵۰ متر متغیر است) و  $\Delta t$  نرخ نمونه‌برداری است که معمولاً ۲ میلی‌ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

## ۲-۳-۱-۱ شرایط تصویرسازی<sup>۲</sup>

در بخش‌هایی که در ادامه می‌آیند به این موضوع خواهیم پرداخت که چگونه می‌توان دو میدان موج  $P_d$  و  $P_{up}$  را محاسبه کرد. در ابتدا فرض می‌شود که این دو میدان قبلاً محاسبه شده و در این بخش بر روی مفهوم انطباق زمانی تمرکز می‌شود. بار دیگر یادآوری می‌شود که در تصویرسازی لرزه-ای، هدف نهایی تخمین ضرایب بازتاب در هر نقطه از زیر سطح زمین است. بدین منظور، در شکل ۲-۲ میدان‌های موجی که به وسیله گیرنده‌های مدفون در نقطه معلوم  $A$  ثبت شده‌اند، بررسی شده است. نقطه  $A$  به عنوان المانی از یک بازتابنده انتخاب شده است. محاسبه میدان موج پایین‌رونده از زمان  $t=0$  آغاز شده و بعد از گذراندن زمان انتشار  $t_0$  به  $A$  رسیده است [روبین، ۲۰۱۰].

<sup>۱</sup> Wavefield extrapolation

<sup>۲</sup> Imaging conditions



شکل ۲-۲: شرایط تصویرسازی در نقطه بازتاب [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

به کمک تکنیک‌های مدل‌سازی این امکان وجود دارد که پیشینه کیفیت زمین در نقطه A بازسازی شده که در شکل ۲-۲ با سری‌های قرمز رنگ از نمونه‌های ثبت شده نشان داده شده است. اگر ضریب بازتاب در نقطه A را برابر r در نظر بگیریم، در هر لحظه بعد از زمان انتشار موج از چشمه،  $t_s$  میدان موج بازتابی  $P_{up}$  با دامنه‌ای معادل  $r \times P_d$  ایجاد می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند.

در گام بعدی، میدان موج بالارونده در محیط انتشار، برونمایی می‌شود. بازسازی دقیق ویژگی‌های میدان موج در المان  $P_{up}(x_A, z_A, t)$  مربوط به میدان موج بالارونده است که توسط جبهه‌های موج به رنگ آبی در شکل دیده می‌شود. پیکان آبی رنگ پیشینه میدان بالارونده‌ای است که توسط A از زمان ثبت پیشینه  $t_{max}$  بطور معکوس تا زمان انفجار در چشمه یعنی زمان صفر بازسازی می‌شود. زمان‌های مختلفی که در روش‌های کوچ بر مبنای پرتو با آنها مواجه هستیم عبارتند از: زمان پرتوی چشمه  $t_s$ ، زمان پرتوی گیرنده  $t_r$  و زمانی که بازتاب صورت گرفته از A در سطح ثبت می‌شود  $t_{rec}$  که این زمان حاصل جمع دو زمان قبلی است.

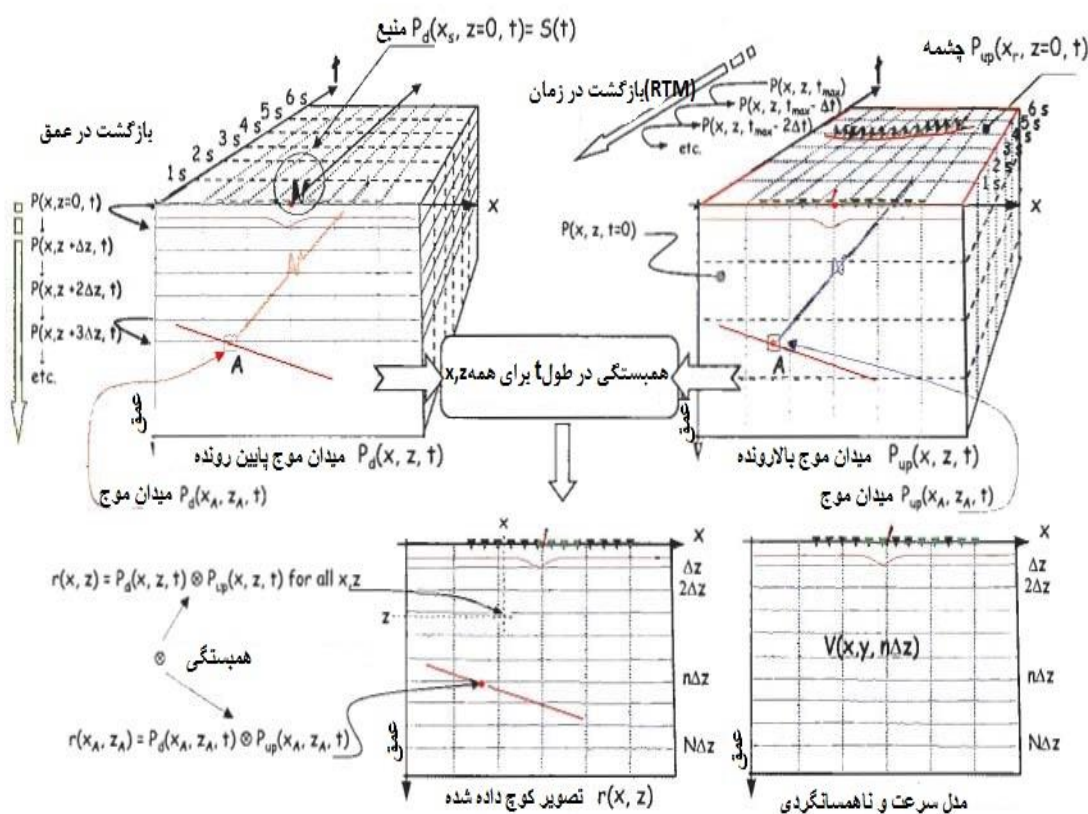
لازم به ذکر است که، حضور بازتابنده حقیقی در  $A$  به وسیله شباهت بین دو میدان موج آشکار می‌شود. این دو میدان در همه زمان‌ها با هم انطباق پیدا کرده و تنها در یک فاکتور مقیاس که همان ضریب بازتاب محلی  $r$  است با هم متفاوت‌اند. ضریب بازتاب  $r$  را می‌توان با نسبت گرفتن بین دو میدان در حوالی زمانی که بازتاب رخ می‌دهد بدست آورد. همچنین می‌توان با میانگین گرفتن از این نسبت برای همه زمان‌ها، ضریب بازتاب را محاسبه نمود. البته این حالت تنها زمانی ممکن خواهد بود که میدان موج پایین‌رونده دارای خاصیت میرایی نباشد. همچنین اشاره می‌شود که شکل ۲-۲ نشان دهنده مورد بسیار ساده با حضور تنها یک بازتابنده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، میدان‌های موج در واقعیت بسیار پیچیده‌تر هستند. معمول‌ترین روش برای تخمین  $r$  تهیه ضریب همبستگی<sup>۱</sup> مقیاس شده دو سری زمانی مربوط به دو میدان موج بالارونده و پایین‌رونده در  $A$  است. این رابطه در بالای شکل ۲-۲ آورده شده و بیان کننده شکل ساده شده‌ای از شرایط تصویرسازی است [اروبین، ۲۰۱۰].

## ۲-۱-۳-۲ برونمایی عمق در مقابل زمان

تا این قسمت مشخص شد که، چگونه ضریب بازتاب  $r$  در نقطه  $A$  در زیر سطح محاسبه می‌شود و اشاره شد که برای محاسبه ضریب بازتاب به اطلاعاتی مانند پیشینه میدان موج در آن نقطه نیاز است. همانطور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، باید تمامی مقادیر عددی  $P_d(x,z,t)$  و  $P_{up}(x,z,t)$  را محاسبه کرده و از این مقادیر، ضریب بازتاب را بدست آورد.

---

<sup>1</sup> Correlation coefficient



شکل ۲-۳: کوچ WE از یک چشمه در ۳ گام انجام می‌شود: مقدار عددی میدان موج پایین‌رونده از منبع محاسبه شود، مقدار عددی میدان موج بالا‌رونده از رکورد چشمه محاسبه شود، شرایط تصویرسازی (ضریب همبستگی در طول  $t$ ) برای تمام  $x, z$  ها اعمال شود (بازگشت در عمق، کوچ یکطرفه، پانل بالایی سمت چپ) و (بازگشت در زمان، کوچ دوطرفه، پانل بالایی سمت راست) [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

دو راه برای بدست آوردن این مقادیر وجود دارد که در زیر آورده شده است:

تکنیک اول شامل محاسبه مقدار عددی این دو میدان موج در عمق‌های متوالی است. مقدار عددی میدان موج پایین‌رونده در سطح معلوم است و مقدار آن برابر است با اثر چشمه  $S(t)$  در  $x_s$  با دانستن سرعت انتشار موج و ناهمسانگردی در لایه  $[0, -\Delta z]$ ، تکنیک‌هایی وجود دارد تا مقدار عددی میدان موج پایین‌رونده  $p_d(x, \Delta z, t)$  در عمق  $\Delta z$  محاسبه شود. همچنین مقدار عددی میدان موج بالا‌رونده  $p_{up}(x, \Delta z, t)$  نیز در سطح معلوم است و با میدان‌های سرعت و ناهمسانگردی مشابه در لایه، می‌توان میدان موج را به صورت پسر و برونمایی و محاسبه کرد، که در عمق  $\Delta z$  چه مقدار عددی خواهد داشت. سپس شرط تصویرسازی در تمام نقاط  $x_{im}$  تا عمق  $\Delta z$  مورد نظر اعمال می‌شود. بدین

طریق ردیف  $\Delta z$  تصویر کوچ داده شده مشخص می‌شود. لازم به توضیح است که، لزومی ندارد مقدار  $x_{im}$  با  $x_r$  مشابه باشد. برای تمامی عمق‌های متوالی، سه بار تکرار پردازش کافی است تا تصویر کوچ داده شده به صورت بازگشتی مشخص گردد. به  $\Delta z$  گام کوچ گفته می‌شود و این تکنیک با نام کوچ چشمه یک‌طرفه<sup>۱</sup> شناخته شده است. گام کوچ<sup>۲</sup> یک پارامتر ذاتی از روش‌های بازگشتی در عمق است. روشی جایگزین برای روش بازگشت عمقی<sup>۳</sup>، بدست آوردن مقادیر دو میدان موج از طریق زمان است. در این مورد بازگشت زمانی، میدان‌های موج پایین‌رونده در هر نقطه و در زمان‌های مختلف  $\Delta t$ ،  $2\Delta t$ ،  $3\Delta t$  و الی آخر محاسبه می‌شوند. در روش فوق تصاویر لحظه‌ای میدان موج پایین‌رونده، منتشر شده از چشمه محاسبه می‌شود. در ابتدای بازگشت زمانی تنها قسمت بالایی دامنه  $(x, z)$  مرتعش می‌شود ولی با ادامه یافتن گام‌های زمانی، تمام فضا به طور تصاعدی پر می‌شود [روبین، ۲۰۱۰].

برعکس در سمت میدان موج بالارونده همه چیز پیچیده‌تر است، بدلیل اینکه انتشار موج از زمان ثبت شده بیشینه  $t_{max}$  شروع می‌شود. در آن زمان فقط مقدار عددی میدان موج در سطح معلوم است (اولین شرط اساسی) ولی با دانستن میدان‌های سرعت و ناهمسانگردی در هر نقطه از فضا و دانستن مقدار عددی میدان موج در سطح در زمان  $t_{max}-\Delta t$  (شرط اساسی دوم)، می‌توان مقدار عددی میدان موج در عمق و در زمان  $t_{max}-\Delta t$  را بازسازی کرد. در روش بازگشت زمانی به یکباره تمام تصویر کوچ داده شده را می‌توان دریافت کرد ولی این امر در انتهای دوره بازگشتی رخ می‌دهد. مراحل بازگشتی با گام‌های زمانی  $\Delta t$  از  $t_{max}$  تا صفر در لحظه‌ای که مقدار میدان موج بالارونده کامل است، انجام می‌گیرد. تنها در این زمان شرط تصویرسازی می‌تواند در هر نقطه از فضا اعمال شود، بدلیل اینکه سری‌های زمانی میدان موج برای تمام نقاط نظیر A در شکل ۲-۳ موجود است.

در مورد روش بازگشت عمقی، شرط تصویرسازی در هر گام عمقی  $n$  اعمال می‌شود و نیاز است

<sup>1</sup> One-way shot point migration

<sup>2</sup> Migration step

<sup>3</sup> Depth recursion

که بطور متوالی مقادیر عددی  $P_d(x,z=n\Delta z,t)$  و  $P_{up}(x,z=n\Delta z,t)$  در حافظه ذخیره شود تا با اعمال شرط تصویرسازی، تکرار بعدی آغاز شود. در محاسبات سه بعدی این مقادیر بسیار بزرگ و چندبعدی هستند ولی با قدرت محاسبه فعلی دستگاه‌ها، این کار عملی خواهد بود.

## ۳-۱-۳-۲ اصول کوچ چشمه یک‌طرفه

حال به جزئیات بیشتری در مورد کارکرد روش بازگشت عمقی در کوچ چشمه یک‌طرفه خواهیم پرداخت. نخست تکنیکی که به صورت چشمه به چشمه اعمال می‌شود را بررسی کرده و سپس در مورد کوچ‌های چند چشمه‌ای بحث خواهیم کرد.

همانطور که قبلاً اشاره گردید روش بازگشتی، بر محاسبه میدان‌های موج پایین‌رونده و موج بالارونده در عمق‌های ثابت متوالی مبتنی است. برای مثال، شکل ۴-۲ سمت چپ، میدان موج پایین‌رونده را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که برای سادگی فقط جبهه‌های موج رسم شده‌اند. در سمت راست یک میدان موج پایین‌رونده کشیده شده است که در سه عمق متفاوت ۰، ۲ و ۵ کیلومتری ثبت شده‌اند [روبین، ۲۰۱۰].



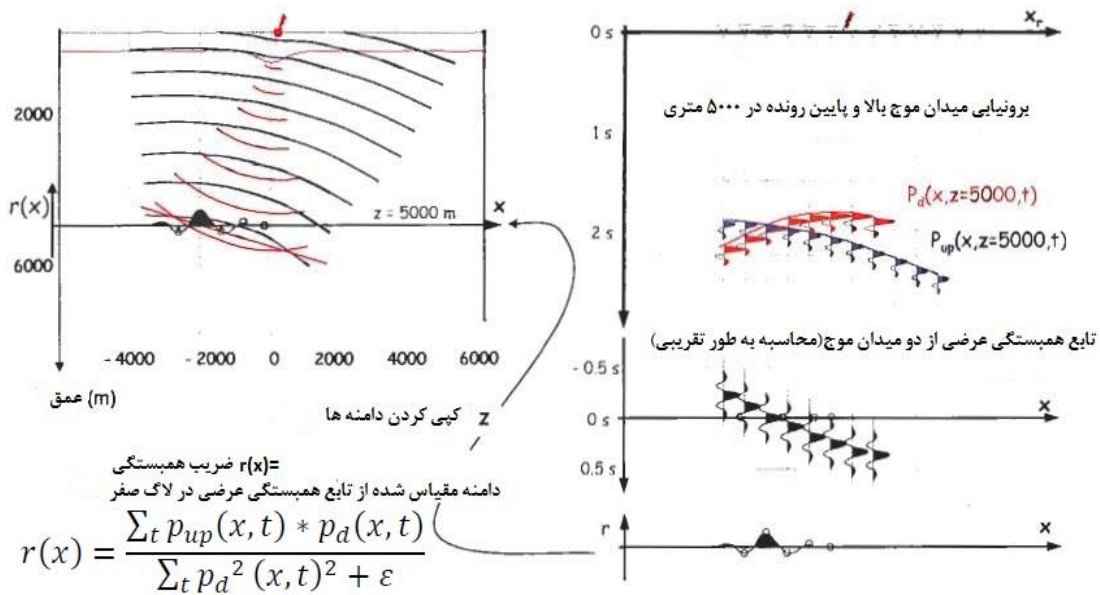
در سطح فقط اثر چشمه<sup>۱</sup>  $S(t)$  وجود دارد که به مکان  $x_s$  محدود می‌شود. در اعماق بیشتر میدان موج در فضا بسط داده می‌شود و با گذشت زمان به نقاط بیشتری در زیر سطح می‌رسد.

شکل ۲-۵ در سمت چپ، تصاویر لحظه‌ای مختلف و عمق‌های فرضی‌ای که گیرنده‌ها باید در آنجا حضور داشته باشند و میدان موج بالارونده را ثبت کنند، نشان می‌دهد. میدان‌های موج بازسازی شده در عمق‌های مختلف ۲، ۴ و ۵ کیلومتری هم در سمت راست شکل مشخص شده‌اند. همانگونه که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود، با حرکت موج به سمت چشمه و یا به سمت زمان سیرهای کمتر، از وسعت میدان موج نیز کاسته می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، میدان‌های موج به صورت بازگشتی به وسیله گام‌های عمقی کوچک  $\Delta z$  محاسبه شده‌اند. این محاسبات از شرایط مرزی در سطح آغاز شده است که به ترتیب رکورد مربوط به منبع و چشمه هستند. این برونیابی بدین دلیل یک‌طرفه نامیده می‌شود که در هر گام عمقی فرض می‌شود که امواج از منبع خود تنها به سمت پایین منتشر می‌شوند (میدان موج پایین‌رونده) و از بازتابنده هم فقط به سمت بالا منتشر می‌شوند (میدان موج بالارونده). گام‌های عمقی ( $\Delta z$ ) بسته به مشخصات زمین‌شناسی و طول موج لرزه‌ای به صورت شاخص بین ۵ تا ۱۰ متر انتخاب می‌شود. این مقدار برای ساختارهایی که از لحاظ زمین‌شناسی پیچیده‌تراند، کوچک‌تر انتخاب می‌شود. همچنین بمنظور حصول داده‌های با قدرت تفکیک‌پذیری بالاتر می‌توان گام‌های عمقی ( $\Delta z$ ) را کوچک‌تر انتخاب کرد. حال به این موضوع اشاره می‌شود که، چگونه میدان موج در عمق  $z + \Delta z$  از روی میدان موج در عمق  $z$  محاسبه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۶ مشخص است، در زمان‌های مختلف، شرط تصویرسازی که در هر عمقی اعمال شده، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، در این شکل میدان‌های موج بالارونده و پایین‌رونده در عمق ۵ کیلومتری بر روی هم نشان داده شده‌اند. در واقع از همبستگی این دو موج در انجام فرایند تصویرسازی استفاده می‌شود. شکل وسط در قسمت راست شکل ۲-۶ همبستگی عرضی دو میدان

---

<sup>1</sup> Source signature

موج به عنوان تابعی از جابجایی زمانی<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶: کوچ چشمه یک‌طرفه که شرط تصویرسازی در عمق ۵۰۰۰ متری، با همبستگی میدان موج بالا و پایین‌رونده اعمال شده است [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

به منظور برقراری شرایط تصویرسازی، لازم است شرط انطباق زمانی بین ردلرزه‌های مربوط به دو

میدان موج حاصل شود. بدین معنی که باید مقدار تاخیر صفر<sup>۲</sup> برای هر ردلرزه بدست آید.

شکل ۲-۷ گام‌های مختلف پردازش بازگشتی در تهیه چشمه کوچ داده شده یک‌طرفه<sup>۳</sup> را بیان

می‌کند. در قسمت بالای شکل، میدان‌های موج بالارونده و پایین‌رونده‌ای که به صورت بازگشتی در

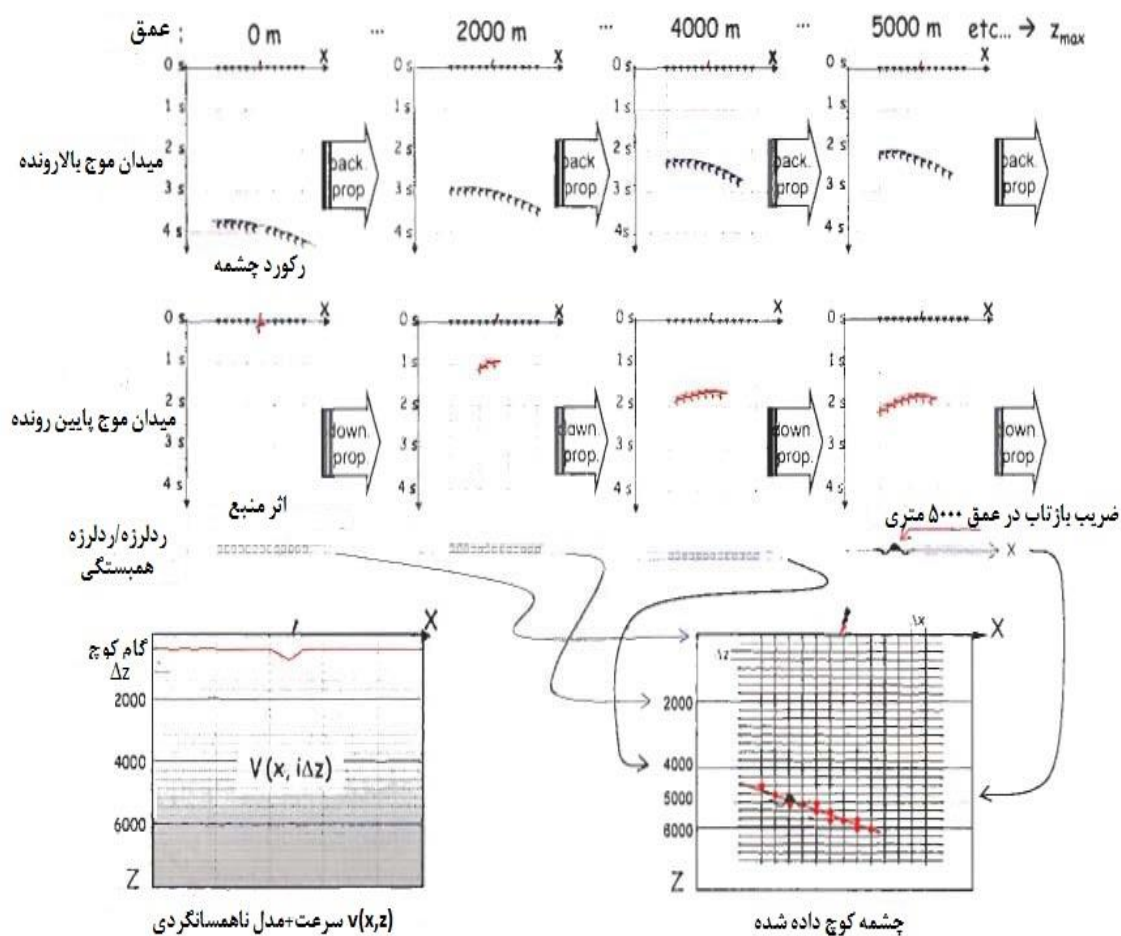
عمق‌های متوالی ۰،  $\Delta z$ ،  $2\Delta z$  و غیره بازسازی شده‌اند، مشاهده می‌شوند (تنها عمق‌های ۰، ۲، ۴ و ۵

کیلومتری نشان داده شده‌اند) [روبین، ۲۰۱۰].

<sup>۱</sup> Function of time shifts

<sup>۲</sup> Zero-lag

<sup>۳</sup> One-way migrated shot



شکل ۷-۲: روند کار کوچ چشمه یکطرفه. دو میدان موج به صورت رد به رد همبسته می شوند و نتیجه در عمق متناظر، چشمه کوچ داده شده را می سازد [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

فرآیند بازگشتی به صورت زیر انجام می پذیرد:

- پردازش از عمق صفر شروع می شود؛ عموماً هنوز سیگنالی ثبت نشده است و موج از چشمه، شروع به انتشار<sup>۱</sup> می کند. بنابراین در تمام مکان ها همبستگی صفر خواهد بود.
- میدان موج پایین رونده از چشمه در عمق  $\Delta Z$  محاسبه می شود. گام کوچ  $\Delta Z$  همانطور که اشاره شد کوچک می باشد و میدان های سرعت و ناهمسانگردی<sup>۲</sup> در لایه  $[-\Delta Z, 0]$  در جهت عمود، ثابت هستند. با این وجود میدان های سرعت و ناهمسانگردی می توانند در راستای

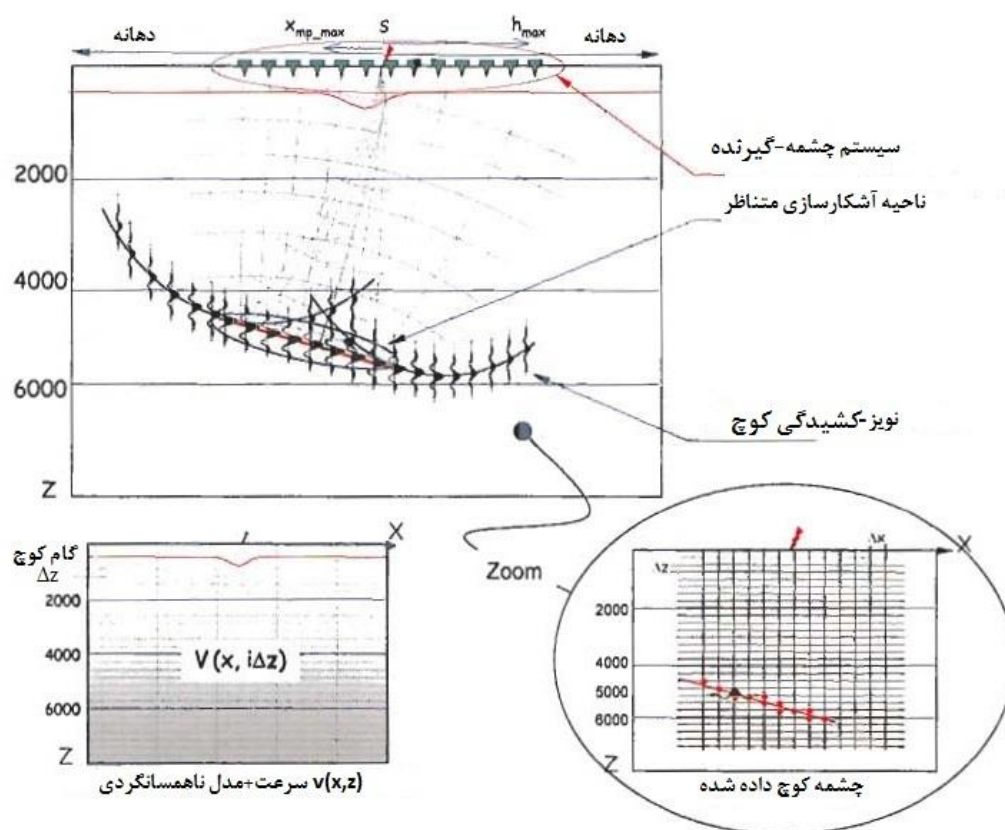
<sup>۱</sup> propagation

<sup>۲</sup> anisotropy

- افقی تغییرات شدیدی داشته باشند، که به صورت  $V(x, \Delta z/2)$  نشان داده می‌شود.
  - میدان موج بالارونده، ناشی از رکورد چشمه نیز در عمق مشابه  $\Delta z$  و با توابع سرعت و ناهمسانگردی مشابه محاسبه می‌گردد.
  - شرط تصویرسازی اعمال می‌گردد، بدین ترتیب که، همبستگی عرضی<sup>۱</sup> بین سری‌های زمانی در هر نقطه دلخواه  $x$  از زیر سطح محاسبه می‌شود.
  - این مقدار برای تمام نقاط واقع ردیف  $\Delta z$  از تصویر کوچ داده شده  $r(x, z=\Delta z)$  محاسبه شده و به آن اختصاص داده می‌شود.
  - اکنون  $P_d(x, \Delta z, t)$  و  $P_{up}(x, \Delta z, t)$  خود به عنوان شرط مرزی جدید برای عمق  $2\Delta z$  مورد استفاده قرار می‌گیرد تا با بکارگیری از آنها و تکرار عملیات با رفتن از عمق  $\Delta z$  تا عمق  $2\Delta z$  و استفاده از تابع سرعت جدید  $V(x, 3\Delta z/2)$ ، میدان های  $P_d(x, 2\Delta z, t)$  و  $P_{up}(x, 2\Delta z, t)$  محاسبه شود.
  - اعمال شرط تصویرسازی در آن عمق، این امکان را می‌دهد مقادیر فوق برای نقاط واقع در ردیف  $5\Delta z$  از تصویر کوچ داده شده محاسبه شده و به آن نقاط اختصاص داده شود.
  - این فرآیند گام به گام برای تمامی نقاط عمقی توسط همان مدل سرعت و ناهمسانگردی تا رسیدن به بیشینه عمق تصویر کوچ داده شده تکرار می‌شود.
- شکل ۸-۲ نتیجه اعمال چنین کوچی بر روی یک چشمه، برای یک مدل ساده با یک بازتابنده را نشان می‌دهد. مسلماً تنها بخشی از بازتابنده که در این آرایش چشمه-گیرنده پوشش داده می‌شود، تصویر خواهد شد. این بخش در شکل ۸-۲ با یک خط مستقیم نشان داده شده است. پرتوها و جبهه-های موج بریده شده، مربوط به داده‌هایی است که واقعاً ثبت شده‌اند [روبین، ۲۰۱۰].

---

<sup>1</sup> Cross-correlation



شکل ۲-۸: نمایی از چشمه کوچ داده شده از داده‌های ترکیبی [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

## ۴-۱-۳-۲ استفاده از تمام چشمه‌ها

در فرآیندی که توضیح داده شد، هر چشمه به طور مستقل ولی با استفاده از مدل سرعت و ناهمسانگردی مشابه، کوچ داده می‌شود. این مورد در شکل ۲-۹ نمایش داده شده است. هر چشمه بخش مختلفی از بازتابنده در زیر سطح را تحت پوشش قرار می‌دهد. در نهایت حاصل جمع سهم<sup>۱</sup> تمامی چشمه‌های کوچ داده شده است که تصویر نهایی کوچ را بدست می‌دهد.

<sup>۱</sup> contribution



به زوایای ورود موج بستگی دارد.

- علاوه بر این، به منظور دستیابی به یک میانگین مناسب، تعداد دفعاتی که یک بخش از بازتابنده در مقدار حاصلجمع پدیدار شده، بایستی شمرده شود و مقدار حاصلجمع بر این عدد تقسیم شود.

اثر لبه‌ها<sup>۱</sup> در کوچ، که در شکل ۲-۸ نشان داده شده است، برای تمام چشمه‌ها متفاوت بوده و می‌توان انتظار داشت که در نهایت، حاصل جمع آنها، نزدیک صفر شده و در نتیجه نسبت سیگنال به نوفه کوچ بهبود خواهد یافت.

مفهوم برداشت تصویر مشترک<sup>۲</sup> (CIG)، در کوچ چشمه، معادل همان تعریف در کوچ دورافت مشترک<sup>۳</sup> است که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است [روبین، ۲۰۱۰].

به این دسته از ردهای لرزه‌ایی، برداشت تصویر مشترک شماره چشمه گفته می‌شود، که به دو منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- کنترل کیفیت داده‌ها
  - پردازش داده‌ها و اعمال فرایند حذف<sup>۴</sup> مناسب به‌منظور کاهش اثر لبه‌ها و سایر نوفه‌ها.
- اشاره به این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که، بازتابی که روی یک برداشت تصویر مشترک ظاهر می‌شود ممکن است از هر گیرنده‌ای آمده باشد و نمی‌توان مستقیماً تشخیص داد که از کدام گیرنده آمده است. این امر در هنگام مواجهه با چشمه‌های سه‌بعدی در موقعیت‌های عملی پیچیده‌تر، سخت‌تر خواهد بود. بدین دلیل که در برونمایی میدان موج بالارونده سیگنال‌هایی که از همه گیرنده‌ها منتشر می‌شوند با هم در یک دسته قرار می‌گیرند و آزیمو<sup>۵</sup> و جهت دورافت و رابطه فیزیکی بین یک بازتاب و سیستم برداشت مربوط به آن (چشمه-گیرنده) از دست می‌رود. این یکی از محدودیت‌های

---

<sup>1</sup> Edge effects

<sup>2</sup> Common image gather

<sup>3</sup> Common offset migration

<sup>4</sup> Muting filter

<sup>5</sup> azimuth

مهم روش‌های برونمایی میدان موج در مقایسه با تکنیک‌های مبتنی بر پرتو است. بدین ترتیب می‌توان دریافت که، چرا برخلاف ورداشت‌های تصویر مشترک دورافت، ورداشت‌های تصویر مشترک شاخص چشمه نمی‌توانند به سادگی برای توموگرافی<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گیرند.

یکی از روش‌های تصویرسازی که بر مبنای حل معادله موج یک‌طرفه عمل می‌کند روش کوچ زمانی کیرشهوف می‌باشد که در زیر به این روش پرداخته می‌شود.

## ۵-۱-۳-۲ کوچ زمانی کیرشهوف<sup>۲</sup>

تقریباً تمامی ژئوفیزیست‌ها بیشتر مراحل پردازش داده‌ها را در حوزه زمان انجام می‌دهند. برای انجام کوچ زمانی، نیاز به داشتن مدل سرعت است. **Error! Reference source not found.** مراحل مختلف کوچ زمانی کیرشهوف را نشان می‌دهد. در این شکل نقطه‌ای با مختصات  $(X, t_{mig})$  بر روی مقطع کوچ داده شده، بوسیله حاصل جمع، نقاط وزن‌داری بدست می‌آید که این نقاط بر روی منحنی  $V(X_{MP}, t_{mig})$  واقع در مقطع دورافت صفر قرار دارند. انتگرال کیرشهوف میدان موج در نقطه  $(X, t_{mig})$  را توسط انتگرال زیر محاسبه می‌کند؛

$$\Delta P(x_{MP}, t_{mig}) = \sum_{x \in aperture} w_x \cdot \Delta P(x_{MP} - x, t(x)) \quad (۲-۳)$$

$$t^2(x) = t_{mig}^2 + \left( \frac{2x}{V_{mig}(x, t_{mig})} \right)^2 \quad (۳-۳)$$

بدین ترتیب مقطع کوچ به صورت نقطه به نقطه با وزن‌های  $w_x$  به کمک روابط فوق برای تمام مقطع دورافت صفر محاسبه می‌شود. این بخش نشان می‌دهد که مقطع کوچ زمانی را می‌توان با فرایندی آسان و اطلاعات اندکی در زمان کوتاه بدست آورد. ولی این مزیت به از دست دادن اطلاعات تکمیلی دیگر و همچنین ناصحیح بودن مقطع نهایی می‌انجامد. همچنین محور قائم در این مقطع زمان است که تفسیر آن مطلوب نظر زمین‌شناسان نمی‌باشد.

<sup>1</sup> tomography

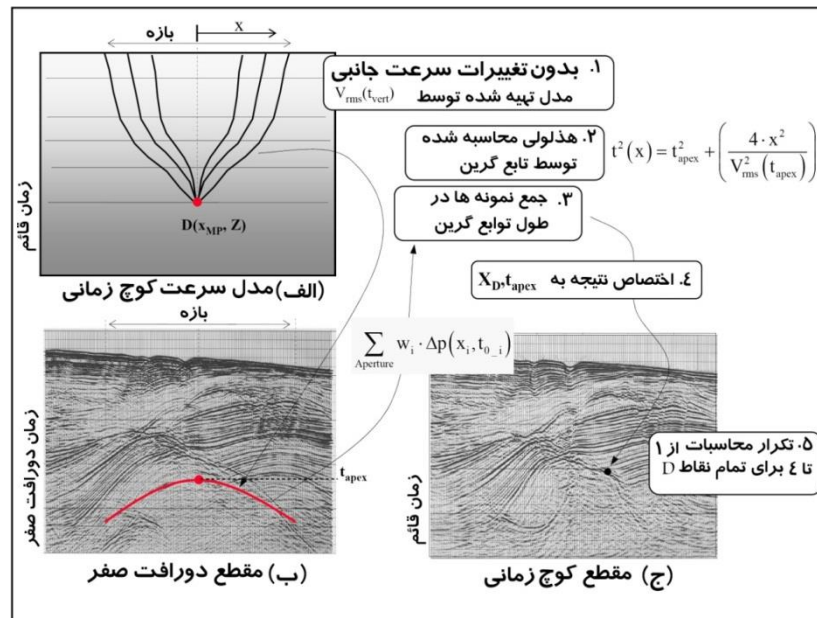
<sup>2</sup> Kirchhoff time migration

## ۲-۳-۱-۶ مزایا و معایب کوچ زمانی

مزیت اصلی کوچ زمانی به اصول اولیه آن بر می‌گردد، بدین معنی که تنها با در اختیار داشتن اطلاعاتی از سرعت انتشار زیرسطحی می‌توان مقطع کوچ تهیه کرد. این اطلاعات سرعت می‌تواند از آنالیز سرعت برانبارش یا حتی سرعت‌هایی که برای تصحیح برون‌راند نرمال بکار می‌رود، انتخاب گردد. اما این ساده‌سازی‌ها، محدودیت‌هایی را نیز به دنبال خواهد داشت که در اینجا تنها به بخشی از آن اشاره می‌شود.

- در این روش فرض می‌شود که سرعت در محیط بدون تغییرات جانبی است، در حالیکه در واقعیت اینگونه نمی‌باشد. با اینحال اگر فرض شود که بتوان تغییرات جانبی سرعت را به عنوان تصحیحی در مدل اعمال کنیم، این مشکل باقی می‌ماند که تا چه میزان می‌توان این تغییرات سرعت جانبی را اعمال کرد. به عبارت دیگر، روش کوچ زمانی تا چه میزان اعمال تغییرات سرعت جانبی، مقطع قابل قبولی بدست خواهد داد.
- تابع گرین تنها در محدوده کوچکی از بازه انتخاب شده هذلولی می‌باشد و در خارج از این محدوده، تخمین‌ها دارای دقت کمتری خواهند بود. انتگرال کیرشهوف همچنین ساختارهای با شیب تند را به خوبی کوچ نمی‌دهد.
- در پردازش‌های تحلیل سرعت، سرعت برانبارش به عنوان تخمینی از سرعت جذر میانگین مربعات  $V_{rms}$  در نظر گرفته می‌شود و همانگونه که عنوان شد، در کوچ زمانی نیز از سرعت برانبارش استفاده می‌شود. ولی با افزایش پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی و همچنین وجود تغییرات سرعت جانبی، از دقت این تخمین نیز کاسته خواهد شد.
- در نهایت باید عنوان کرد که هنوز نظر مساعدی در استفاده از مقطع کوچ زمانی برای تفسیرهای زمین‌شناسی وجود ندارد. در اینگونه مقاطع، لایه‌های با سرعت پایین ضخیم‌تر از میزان واقعی‌شان نشان داده می‌شوند و برعکس لایه‌هایی که دارای سرعت بالایی هستند،

نازک‌تر از مقدار واقعی، خود را نشان می‌دهند. علاوه بر آن در ساختارهایی که تغییرات سرعت جانبی وجود دارد، شیب لایه‌ها در جهت معکوس ترسیم می‌شوند [اروین، ۲۰۰۳].



شکل ۲-۱۰: مراحل گام‌به‌گام کوچ زمانی کیرشهوف در مقطع دورافت صفر و مدل سرعت کوچ [بعد از روبین، ۲۰۰۳].

### ۲-۳-۲ روش‌های تصویرسازی مبتنی بر حل معادله موج دو طرفه

این روش‌ها که روش‌های جدیدی در تصویرسازی لرزه‌ای می‌باشند با استفاده از حل معادله موج دوطرفه<sup>۱</sup> عمل می‌کنند، که از این دسته روش‌ها می‌توان به روش‌های وارون‌سازی کامل شکل موج<sup>۲</sup> و کوچ زمانی معکوس<sup>۳</sup> نام برد که در این فصل به روش وارون‌سازی کامل شکل موج پرداخته می‌شود و در فصل سوم به طور کامل روش کوچ زمانی معکوس که مورد بحث این پایان‌نامه است، مورد بررسی قرار می‌گیرد [اروبین، ۲۰۱۰].

<sup>1</sup> Two-way wave equation<sup>2</sup> Full waveform inversion<sup>3</sup> Reverse time migration

## ۱-۲-۳-۲ وارون سازی کامل شکل موج

طی سالیان گذشته با توجه به جوان بودن روش وارون سازی شکل کامل موج (FWI) و پیچیدگی های ذاتی و محاسباتی آن، اکثر محققین این روش را برای مدل های مصنوعی دوبعدی بکار برده اند. با این وجود به دلیل جذابیت های این روش، موارد اعمال آن روی داده های واقعی نیز روندی رو به رشد داشته است. اکثر محققین در تحقیقات اخیر خود برای وارون سازی شکل موج، داده های واقعی با مقیاس ها و هندسه های برداشت مختلف از تقریب معادله موج آکوستیکی<sup>۱</sup> استفاده نموده و مدل سرعت امواج  $p$  را بدست آورده اند. هر چند اعتبار استفاده از تقریب آکوستیکی زیر سوال است، اما برتری محاسباتی آن نسبت به حالت الاستیک باعث شده به صورت گسترده ای در وارون سازی شکل کامل موج داده های واقعی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این از آنجا که تنها یک نوع پارامتر  $V_p$  درگیر وارون سازی شکل کامل موج آکوستیک می شود، فرایند وارون سازی نسبت به حالت الاستیک خوش رفتار<sup>۲</sup> تر می شود. از طرف دیگر در حالت وارون سازی شکل کامل موج آکوستیکی نیازی به دانستن مدل اولیه سرعت امواج برشی  $V_s$  نیز نخواهد بود، همچنین با توجه به اینکه عموماً چشمه های مورد استفاده در لرزه نگاری به صورت ضربه ای و نیروی قائم عمل می کنند امواج برشی اندکی تولید می نمایند. از طرف دیگر در روش وارون سازی شکل کامل موج معمولاً فازهای اولیه لرزه-نگاشت که بیشتر مربوط به امواج  $P$  می باشند وارون می شوند که همه این موارد بر اعتبار استفاده از تقریب آکوستیک می افزایند. از اینرو پیش پردازش داده های واقعی به منظور وارون سازی شکل کامل موج ضروری می باشد. هدف از پیش پردازش<sup>۳</sup> آماده سازی لرزه نگاشت های ثبت شده و اعمال بعضی تصحیحات روی دامنه داده هاست به گونه ای که با تقریب آکوستیک مورد استفاده در مدلسازی هماهنگی بیشتری ایجاد شود.

---

<sup>1</sup> Acoustic

<sup>2</sup> Better posed

<sup>3</sup> Pre-processing

در روش وارون سازی شکل کامل موج، بازسازی به صورت چندمقیاسی<sup>۱</sup> صورت می گیرد تا بتوان بر غیرخطی بودن مساله غلبه نمود. بدین منظور وارون سازی مولفه های فرکانس پایین در ابتدا صورت می گیرد تا ساختارهای طول موج بلند مدل شکل گیرد و در ادامه وارون سازی مولفه های بزرگ انجام می شود، این امر یکی از فواید انجام وارون سازی شکل کامل موج در حوزه فرکانس بشمار می آید.

شکل ۱۱-۲ دید کلی از وارون سازی شکل کامل موج را ارائه می دهد که به این صورت است:

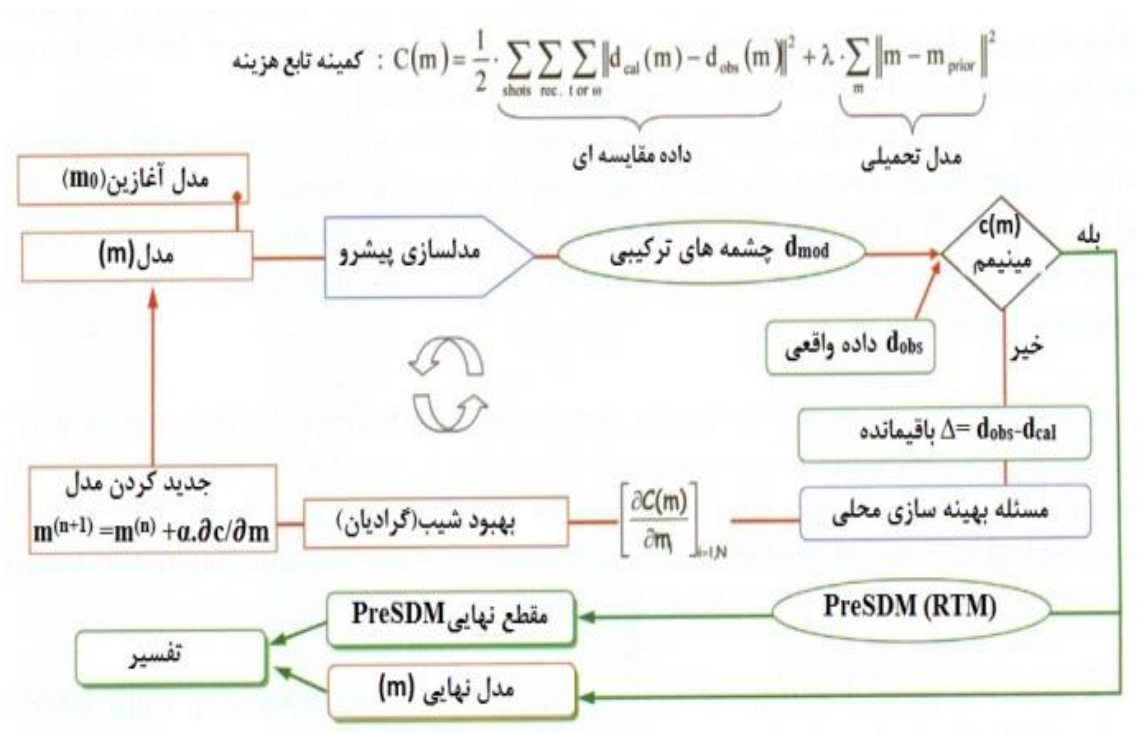
- مدل پارامتری شده از ویژگی های الاستیک زمین که قسمت مجهول مسئله می باشد.
- رزلوشن مسئله پیشرو که در اینجا همان مدلسازی لرزه ای است.
- تخمین تابع هزینه<sup>۲</sup> که می تواند بخش مرتب سازی مساله باشد. کمینه کردن این تابع، مدل پارامتری شده بهینه را بدست می دهد.
- ساده سازی و خطی کردن مساله در هر مرحله از بروز رسانی.
- محاسبه گرادیان، که در بروز رسانی مدل در هر مرحله لازم است.
- تعیین کردن یک معیار متوقف سازی به منظور محدود کردن تکرارها.

مدل مذکور در بطن پردازش قرار دارد این مدل، قسمت مجهول مسئله معکوس می باشد پارامتری کردن مدل مذکور در روش های مختلف، متفاوت است.

---

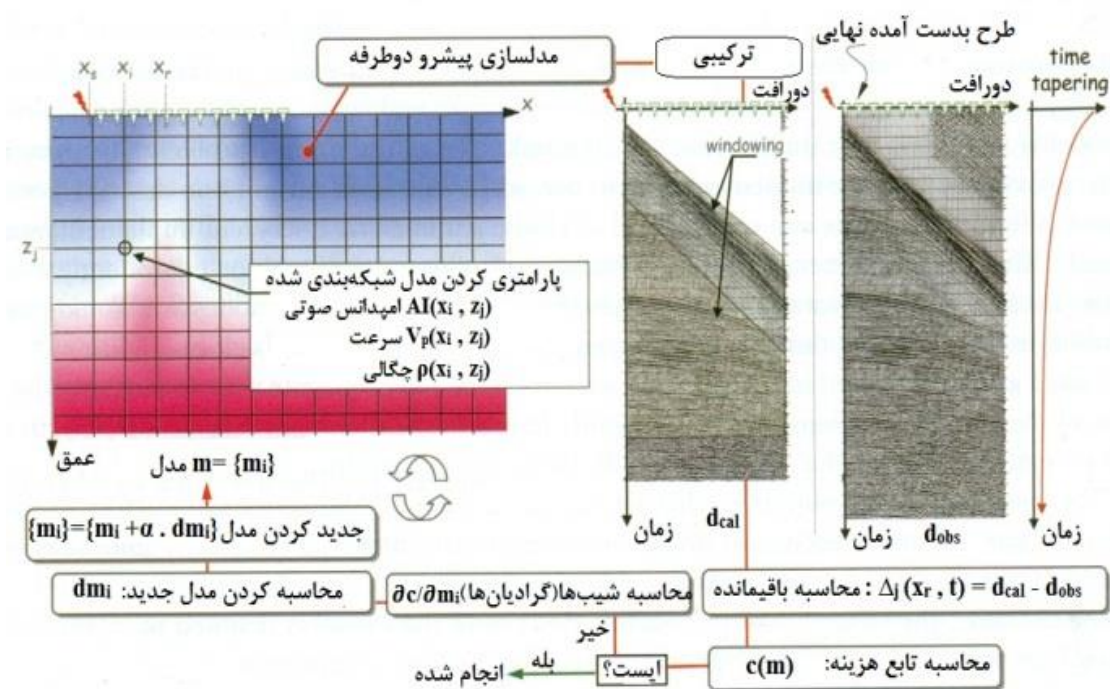
<sup>۱</sup> Multi-scale

<sup>۲</sup> cost function



شکل ۲-۱۱: اصول و روند کار وارون سازی شکل کامل موج. مسئله پیشرو از ورداشت های ترکیبی چشمه برای یک مدل شبکه بندی شده از سرعت های مربوط به نمونه آکوستیک محاسبه می شود. تابع هزینه اختلاف بین رکوردهای چشمه ترکیبی و مدل های واقعی را محدود می کند [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

قسمت سمت چپ شکل ۲-۱۲ مدل شبکه بندی شده پارامترهای الاستیک را نشان می دهد. در مقیاس صنعتی، این پارامترها انتشار موج فشاری با سرعت  $V_p$  می باشد [روبین، ۲۰۱۰].



# کوچ زمانی معکوس $RTM$

### ۳-۱ مقدمه

یکی از مراحل پردازش داده‌های لرزه‌ای کوچ می‌باشد که عبارتست از، عمل بازگردان وقایع پراش در ثبت‌های کوچ داده نشده به نقاط و در نتیجه انتقال وقایع بازتابی به مکان‌های صحیح‌شان و ساختن یک تصویر از ساختارهای درون زمین است.

الگوریتم‌های کوچ، علاوه بر جابجایی مکانی و متمرکزسازی، تنظیمات دامنه و فاز را نیز به منظور تصحیح تاثیرات واگرایی مسیرهای پرتو هنگام انتشار موج اعمال می‌کنند. هنگامی که در مقطع برانبارش، بازتابنده‌های شبیدار وجود داشته باشند، به کوچ زمانی نیاز است. کوچ زمانی تا هنگامی که تغییرات جانبی سرعت، کم تا متوسط است، مناسب خواهد بود. زمانی که تغییرات جانبی سرعت قابل ملاحظه باشد، کوچ زمانی تصویر واقعی از ساختارهای زیرسطحی بدست نخواهد داد. لذا در این حالت لازم است که از کوچ عمقی استفاده شود. در مواقعی که شیب‌های متضاد با سرعت‌های برانبارش متفاوت در مقطع وجود دارند، کوچ پس از برانبارش که بر فرض یکسان بودن مقطع برانبارش<sup>۱</sup> با مقطع دورافت صفر عمل می‌کند، جواب قابل قبولی بدست نخواهد داد. در این زمان لازم است که از روش‌های جدیدتری مانند کوچ زمانی معکوس (RTM) استفاده شود که ثابت شده تصویر دقیق‌تری از ساختارهای زیرسطحی ارائه می‌دهد [ژو و لاینز، ۱۹۹۸].

روش‌های معمول کوچ عموماً بر اساس حل معادلات انتشار موج به شکل یک‌طرفه عمل می‌کنند، چراکه در حل معادلات کامل شکل موج، پیچیدگی ریاضی وجود دارد. با این حال روش کوچ زمانی معکوس یک راه حل دوطرفه را ارائه می‌دهد که دقت بیشتری از انتشار موج در محیط برای شیب‌های بیشتر از ۷۰ درجه داشته و همچنین می‌تواند در مورد دامنه بازتابنده‌ها و موقعیت ساختارها دقت بیشتری در تصویرسازی لرزه‌ای از خود نشان دهد. روش کوچ زمانی معکوس بر اساس حل عددی به

---

<sup>1</sup> stack

روش تفاضل محدود<sup>۱</sup> برای حل معادله موج کامل عمل می‌کند.

تکنیک کوچ زمانی معکوس، استفاده از انتشار کامل میدان موج در درون زمین می‌باشد که برای این کار بایستی انواع مختلف روش‌های عددی را در حل معادله موج کامل بکار برد، که این شیوه به نوعی زیر روش کوچ برونمایی میدان موج<sup>۲</sup> می‌باشد [بوردینگ و لاینز، ۱۹۹۷].

کوچ برونمایی میدان موج بر اساس دو نوع برونمایی پایه‌ریزی شده که عبارتند از: برونمایی عمقی<sup>۳</sup> و برونمایی زمانی<sup>۴</sup>. روش کوچ زمانی معکوس نوعی برونمایی زمانی است که بر اساس معادله موج دوطرفه<sup>۵</sup> عمل می‌کند.

همانطور که قبلاً اشاره شد، تصویرسازی لرزه‌ای به منظور بدست آوردن اطلاعاتی از ساختارهای زیرسطحی انجام می‌شود که مفسر را در تفسیر هرچه بهتر مقاطع لرزه‌ای کمک می‌کند. در این فصل، کوچ زمانی معکوس مورد بحث قرار می‌گیرد که به نوعی تصویرسازی مبتنی بر حل معادله موج دوطرفه است.

### ۲-۳ اصول و روند کار RTM

کوچ زمانی معکوس یک روش برونمایی معادله موج دوطرفه است که در این قسمت کوچ تک چشمه مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر بتوان میدان موج بالارونده و میدان موج پایین‌رونده در نقطه‌ای با مختصات  $(x, y, z)$  را بدست آورد، ضریب بازتاب در آن نقطه برابر همبستگی عرضی میان دو میدان موج بالارونده و پایین‌رونده می‌باشد.

برای حالت تک چشمه، میدان‌های موج بالارونده و پایین‌رونده به صورت حجمی تشکیل می‌شوند. شکل ۱-۳ انتشار میدان‌های موج بالارونده و پایین‌رونده بر حسب زمان را در راستای سطح نشان می‌-

---

<sup>1</sup> finite difference

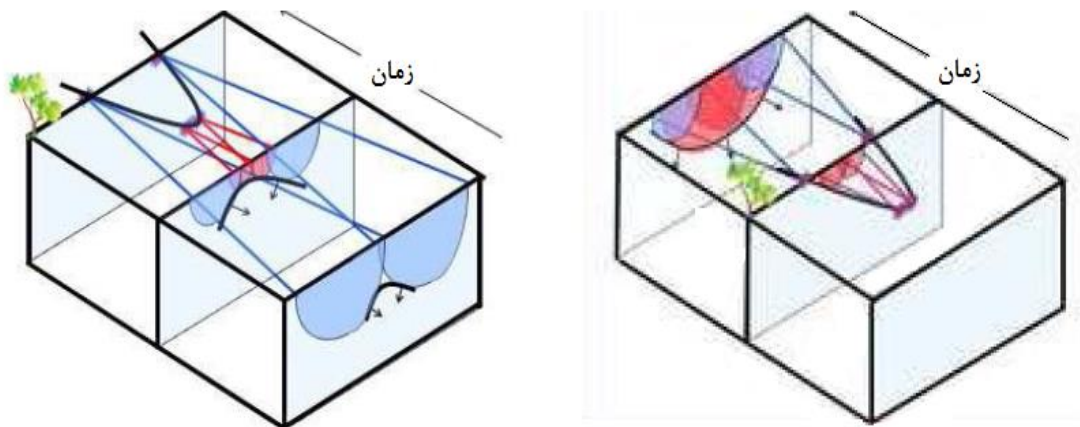
<sup>2</sup> Wavefield extrapolation migration

<sup>3</sup> Extrapolation in depth

<sup>4</sup> Extrapolation in time

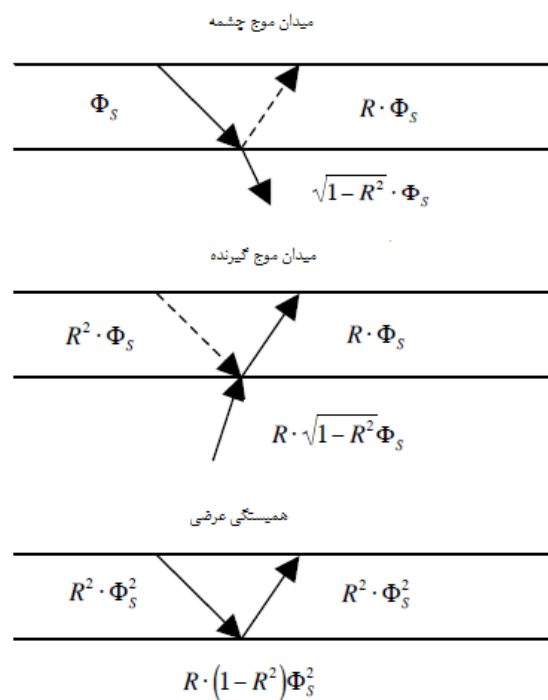
<sup>5</sup> two-way wave equation

دهد. لازم به ذکر است که برش‌های قائم ثابت زمانی درون این داده‌های حجمی، تصاویر لحظه‌ای از میدان‌های فوق می‌باشند.



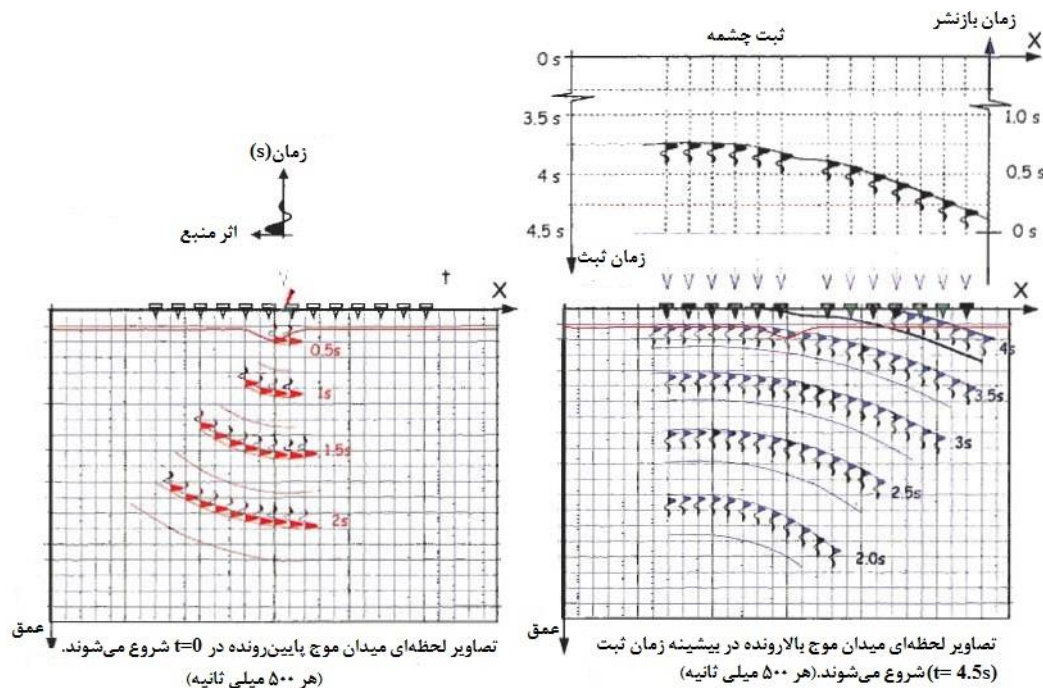
شکل ۱-۳: انتشار میدانهای موج؛ سمت راست میدان موج پایین‌رونده و سمت چپ میدان موج بالارونده [بعد از شوستر، ۲۰۱۰].

شکل ۲-۳ نمایی کلی از یک مدل ساده از یک بازتابنده افقی را نشان می‌دهد که میدان موج چشمه و گیرنده شامل هر دو قسمت از موج پایین‌رونده و بالارونده می‌باشد. برای این مدل ساده که شامل یک چشمه و گیرنده است هر دو میدان موج براحتی قابل تفکیک می‌باشند، که در این شکل R نشان دهنده ضریب بازتاب و  $\Phi_s$  نشان دهنده تابع چشمه می‌باشد [کالین و گویتن، ۲۰۰۶].



شکل ۳-۲: میدان موج چشمه (بالا)، میدان موج گیرنده (وسط) و همبستگی عرضی میدان موج چشمه و گیرنده (پایین) [بعد از کالین و گویتن، ۲۰۰۶].

شکل ۳-۳ یک سری از تصاویر لحظه‌ای را برای مدل دوبعدی ارائه می‌دهد. رخداد‌های قرمز رنگ که در سمت چپ شکل نشان داده شده است مربوط به میدان‌های موج پایین‌رونده و رخداد‌های آبی رنگ در سمت راست مربوط به میدان موج بالارونده می‌باشند. همچنین اثر منبع به میدان موج پایین‌رونده مربوط بوده و ثبت چشمه برای موج بالارونده صورت می‌گیرد.



شکل ۳-۳: کوچ زمانی معکوس RTM؛ تصاویر لحظه‌ای از میدان‌های موج بالارونده و پایین‌رونده که در هر ۱ یا ۲ میلی ثانیه محاسبه می‌شوند. [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

با این تصاویر لحظه‌ای و شرایط تصویرسازی که در دسترس است می‌توان اصول کوچ زمانی معکوس را به صورت زیر معرفی کرد، همانند آنچه که در شکل ۳-۳ بیان شده است:

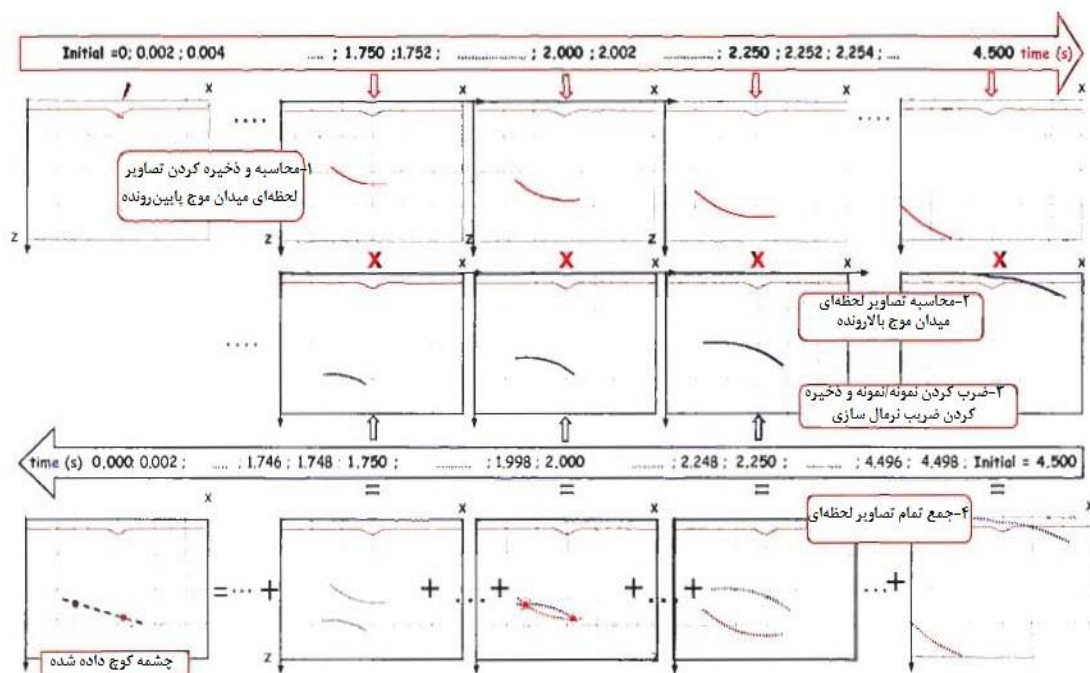
- در ابتدای مدلسازی، تصاویری از میدان موج پایین‌رونده در گام‌های زمانی متوالی  $dt, 2dt, \dots, 3dt$  بدست آورده و این تصاویر را ذخیره می‌کنیم.
- این فرایند یک فرایند بازگشتی است؛ بدین معنا که تصویر مربوط به زمان  $t+dt$  از روی تصویر مربوط به زمان  $t$  بدست می‌آید. این فرایند با استفاده از کل میدان سرعت  $v(x,z)$  صورت می‌گیرد. مقدار شاخص  $dt$  عموماً ۱ یا ۲ میلی‌ثانیه است. برای مثال از یک مقطع زمانی ۶ ثانیه‌ای، ۳۰۰۰ یا ۶۰۰۰ داده دریافت می‌شود و باید حداقل تعدادی از آنها که برای یک همبستگی دقیق مطلوب است (حدود نصف آنها) ذخیره گردد که این در واقع همان اندازه تصویر کوچ داده شده نهایی می‌باشد.

- پس از آنکه مرحله اول به اتمام رسید، مرحله دوم محاسبه میدان موج بالارونده است. محاسبه میدان موج اینبار در جهت عکس زمان انجام می‌شود که این مرحله شامل محاسبه تصاویر برونمایی شده بازگشتی از میدان موج بالارونده است.

- با بکار بردن اصل تصویرسازی، در هر گام زمانی از مرحله دوم محاسبه میدان موج، هر نمونه مربوط به میدان موج پایین‌رونده در نقطه  $(x,z)$  با نمونه متناظر آن در میدان موج بالارونده ضرب شده و به نقطه متناظر  $(x,z)$  تصویر کوچ داده شده اختصاص داده می‌شود. تصویر کوچ داده شده به صورت تصاعدی ساخته می‌شود، یعنی هر یک از گام‌های زمانی در همبستگی حالت تصویرسازی سهم دارند.

- در انتها تصویری کوچ یافته از ساختارهای زیرسطحی بدست می‌آید که قابل مقایسه با سایر روش‌های کوچ است [روبین، ۲۰۱۰].

اصول کوچ زمانی معکوس در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، ابتدا بایستی تمامی تصاویر لحظه-ای میدان موج پایین‌رونده را محاسبه و ذخیره کرد. سپس تصاویر لحظه‌ای برونمایی شده میدان موج بالارونده را بطور برگشتی محاسبه می‌کنیم. ذخیره کردن ۶۰۰۰ و حتی ۳۰۰۰ تصویر لحظه‌ای نیازمند حجم بالایی از حافظه است که پیشرفت و سرعت فرایند کوچ زمانی معکوس را در یک بازه زمانی کاهش می‌دهد.



شکل ۳-۴: اصول کوچ زمانی معکوس RTM از یک چشمه دوبعدی؛ تصاویر لحظه‌ای میدان موج بالارونده و پایین‌رونده که زمان مشابهی دارند تک به تک در یکدیگر ضرب شده‌اند. نتیجه در شکل جمع زده شده که تصاویر لحظه‌ای محاسبه شده را تشکیل می‌دهد [بعد از روبین، ۲۰۱۰].

### ۳-۲-۱ کنترل تمامی چشمه‌ها در RTM

- روشی که برای چشمه‌های مختلف در کوچ زمانی معکوس ارائه شد، اختلاف چندانی با آنچه در کوچ چشمه یک‌طرفه بیان شد، ندارد. برای توضیح بیشتر به موارد زیر اشاره می‌کنیم:
- هر چشمه بطور جداگانه با میدان سرعت ناهمسانگرد<sup>۱</sup>، پردازش شده و سهم تمامی چشمه‌ها با هم جمع می‌شود تا به مقطع نهایی کوچ زمانی معکوس برسیم.
  - تعیین بازه چشمه<sup>۲</sup> در کوچ زمانی معکوس بسیار مهم است که دلیل این مساله نیاز به میزان بالای حافظه برای پردازش است.
  - ورداشت تصویر مشترک مربوط به چشمه در صورت نیاز برای کنترل کیفیت و یا کاهش نوفه

<sup>۱</sup> Anisotropic velocity field

<sup>۲</sup> Shot aperture

قبل از جمع کردن، استفاده می‌شود. باید توجه داشت که مفهوم برداشت تصویر مشترک مربوط به چشمه (اندیس چشمه) در حالت دوبعدی ساده است و هنگامی که برداشت سه-بعدی توام با آزمون داشته باشیم، این مفهوم پیچیده تر می‌شود.

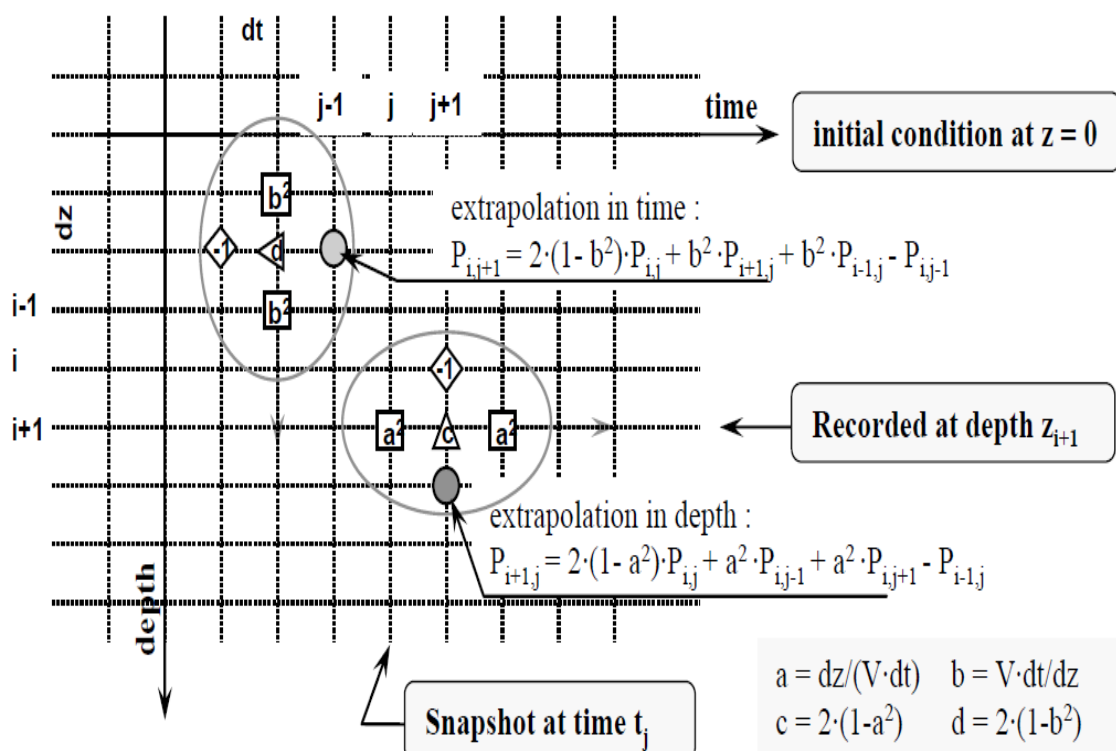
- در ادامه این فرایند برای تمامی چشمه‌ها انجام می‌گیرد و متناوباً چشمه‌ها باید کوچ داده شوند.
- آنالیز سرعت کوچ<sup>۱</sup> بعد از RTM می‌تواند در فرایندی بسیار شبیه به کوچ چشمه یک‌طرفه انجام گیرد.

### ۳-۳ برونابی زمانی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود

برونابی زمانی پردازشی است که به ما اجازه می‌دهد تا یک تصویر لحظه‌ای را در زمان  $t$  از تصویر لحظه‌ای در زمان  $t+dt$  (برای بازسازی میدان موج پایین‌رونده) یا  $t-dt$  (برای بازسازی میدان موج بالارونده) محاسبه کنیم. در روش کوچ زمانی معکوس، این پردازش هزاران مرتبه در یک چشمه بکار برده می‌شود. بنابراین این پردازش بایستی آنقدر سریع صورت گیرد که در همان زمان با دقت بالا انجام شود. اخیراً فرایند برونابی در حوزه زمان با بکارگیری روش عددی تفاضل محدود انجام شده - است. شکل ۳-۵ برونابی زمانی و عمقی میدان موج را با استفاده از روش عددی تفاضل محدود نشان می‌دهد.

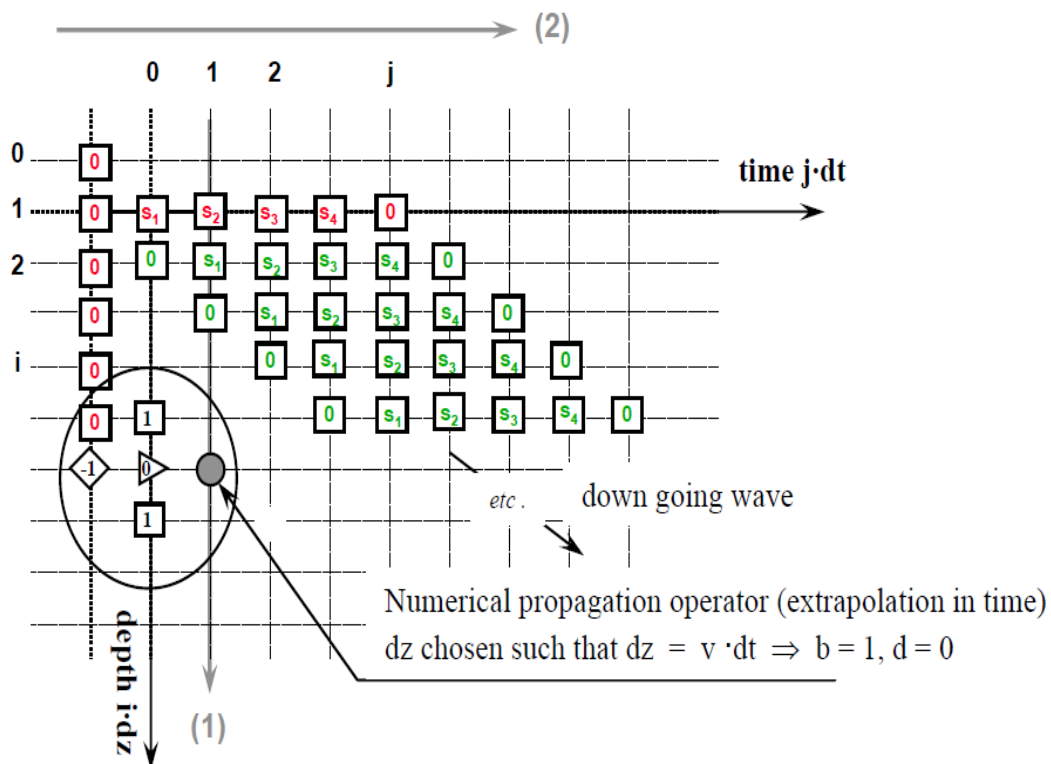
---

<sup>1</sup> Migration velocity analysis



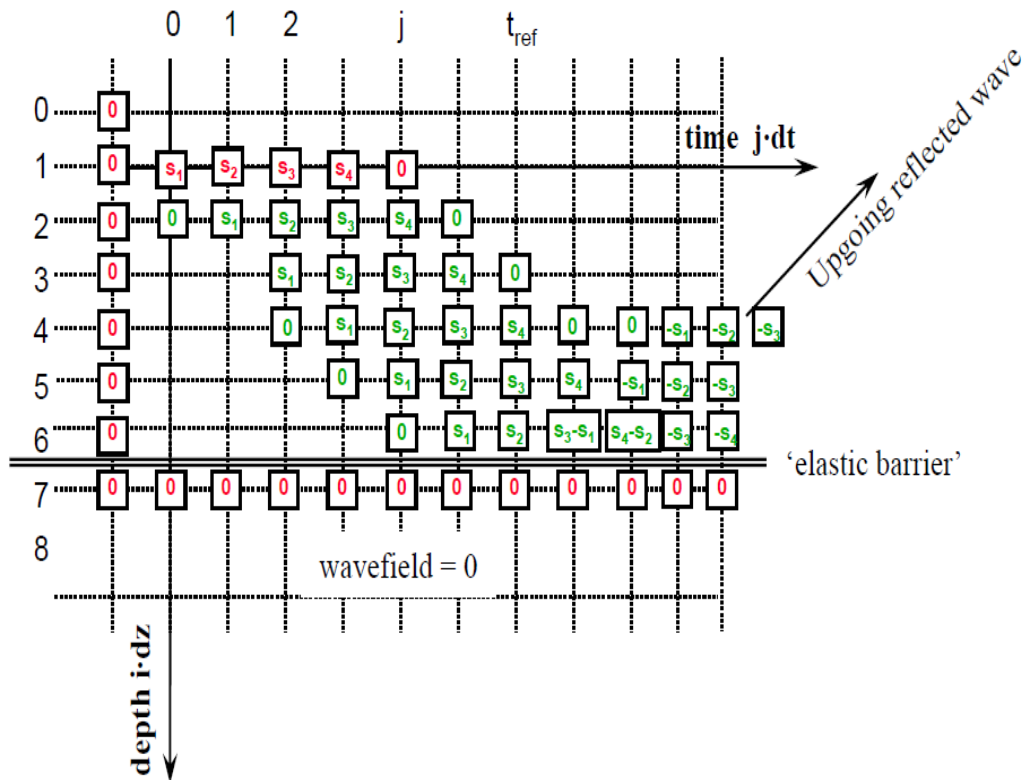
شکل ۳-۵: انجام برونیابی زمانی و عمقی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود [اروبین، ۲۰۰۳].

کوچ زمانی معکوس به روش برونیابی زمانی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود انجام می-شود که ابتدا بایستی تصاویر لحظه‌ای میدان موج پایین‌رونده را با استفاده از روش تفاضل محدود بدست آورد، همانطور که قبلاً اشاره گردید مقدار عددی میدان موج پایین‌رونده در سطح معلوم است که با این شرط می‌توان میدان موج پایین‌رونده را برونیابی کرد که برونیابی زمانی میدان موج پایین‌رونده در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: برونمایی زمانی میدان موج پایین رونده با استفاده از روش عددی تفاضل محدود [اروبین، ۲۰۰۳].

بعد از بدست آوردن تصاویر لحظه‌ای میدان موج پایین رونده بایستی تصاویر لحظه‌ای میدان موج بالارونده را نیز با استفاده از روش عددی تفاضل محدود بدست آورد که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳: برونمایی میدان موج بالا رونده با استفاده از روش عددی تفاضل محدود [اروبین، ۲۰۰۳].

میدان‌های موج در کامپیوتر، توابع رقومی شده با فواصل نمونه‌برداری زمانی و مکانی  $dy$ ،  $dx$ ،  $dt$  و در حالت سه‌بعدی  $dz$  هستند. میدان موج  $P_{up}$  بصورت یک ماتریس چندبعدی با پارامتر (عناصر و المان)  $P_{i,j,k}$  برای  $P_{up}(i,dx, j,dy, k,dt)$  تعریف می‌شود. همانطور که در شکل برای حالت دو بعدی نمایش داده شده، ارائه مجدد عددی یک تصویر لحظه‌ای، یک ماتریس دوبعدی است و کل میدان یک حجم سه‌بعدی شبکه‌بندی شده است. لازم به ذکر است که شبکه‌ها به این صورت در نظر گرفته می‌شوند که  $dx$ ،  $dz$ ،  $dt$  ثابت هستند. پس بایستی معادله موج را به طرح تفاضل محدود، قابل استفاده برای توابع عددی تبدیل کرد، که به وسیله‌ی تقریب مشتقات تفاضل محقق می‌شود. مناسب‌ترین فرمول برای این امر بسط مرتبه اول سری تیلور است [اروبین، ۲۰۱۰].

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{x+dx/2} \approx \frac{p(x+dx) - p(x)}{dx} \quad \text{معادله ۳-۱:}$$

در مورد میدان موج بالارونده، بایستی علامت زمان را معکوس کرد، که شامل ثبت چشمه می- باشد. حال با یک چشمه فرضی مواجهیم که از بیشینه زمان ثبت شده  $t_{\max}$  تا زمان صفر، اجرا می- شود.

فرض می‌شود ۲ ماتریس تصویر لحظه‌ای قبلی، در تکرارهای ماقبل کامل شده است. هر کدام از این عناصر در حقیقت ترکیب خطی از عناصر موجود در دو ماتریس قبلی بوده و بنابراین می‌توانند یکی بعد از دیگری محاسبه شود تا زمانیکه ماتریس کامل شود. زمانیکه این عمل برای تمامی عناصر اتفاق افتاد، تصویری لحظه‌ای در زمان  $t-dt$  داریم و برای پردازش زمانی بعدی،  $t-2dt$  تکرار شده‌است، بازگشت تا زمانی ادامه دارد که یکی به زمان صفر برسد. در این روش جدای از اثر طول‌موج کوتاه هموار، سرعت می‌تواند خیلی سریع به صورت افقی و عمودی تغییر کند. این یکی از مزایای روش برونابی میدان موج است [روبین، ۲۰۱۰].

### ۳-۴ انجام روش RTM بر داده‌های لرزه‌ای مصنوعی

در این بخش روش RTM را بر دو داده لرزه‌ای مصنوعی اعمال کرده و در انتها نتایج به صورت شکل ارائه شده است. داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در این تحقیق، داده لرزه‌ای Sigsbee 2A و داده لرزه‌ای BP-2004 می‌باشد که در زیر بطور خلاصه در مورد داده‌های فوق توضیحاتی ارائه شده است. سپس روش پردازشی فوق بر دو داده واقعی لرزه‌ای، یکی داده لرزه‌ای منطقه‌ای در غرب ایران و دیگری منطقه‌ای در مرز آلمان و فرانسه، اعمال گردید که متأسفانه به دلیل محدودیت امکانات سخت‌افزاری و محاسباتی مناسب، نتایج قابل قبولی بدست نیامد که در انتها یکی از تصاویر بدست آمده از اعمال کوچ زمانی معکوس بر داده‌های فوق آورده شده است.

### ۳-۴-۱ داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A

داده لرزه‌ای Sigsbee 2A به عنوان یک داده مصنوعی استاندارد از روی یک مدل واقعی در خلیج مکزیک توسط شرکت نفتی SMAART و به کمک تکنیک تفاضل محدود<sup>۱</sup> (FD) ساخته شده است. این مدل در واقع الگویی از برداشت لرزه‌ای دریایی است که هم دارای لایه‌های رسوبی و افقی بوده و هم دارای ساختار گنبدی شکل با هندسه پیچیده به همراه یک ساختار ناودیس مانند می‌باشد. همچنین مدل دارای نقاط پراش متعددی است که در بین قسمت لایه‌ای شکل تعبیه شده است. تمامی لایه‌ها در این مدل ایزوتروپ می‌باشند. هندسه مدل نیز در واحدهای انگلیسی ارائه شده. حجم داده‌های قبل از برانبارش در مدل Sigsbee 2A به کمک تکنیک تفاضل محدود (FD) در تخمین معادله آکوستیک موج تهیه شده است. بنابراین داده‌ها دارای انواع چندگانه‌هایی است که در لایه‌های افقی بوجود می‌آیند. سطح آب به عنوان یک سطح آزاد در نظر گرفته نشده، بنابراین چندگانه‌های حاصل از ستون آب در مدل وجود نخواهند داشت. چشمه‌ها و گیرنده‌ها ۲۵ فوت زیر سطح آب واقع

---

1-Finite difference

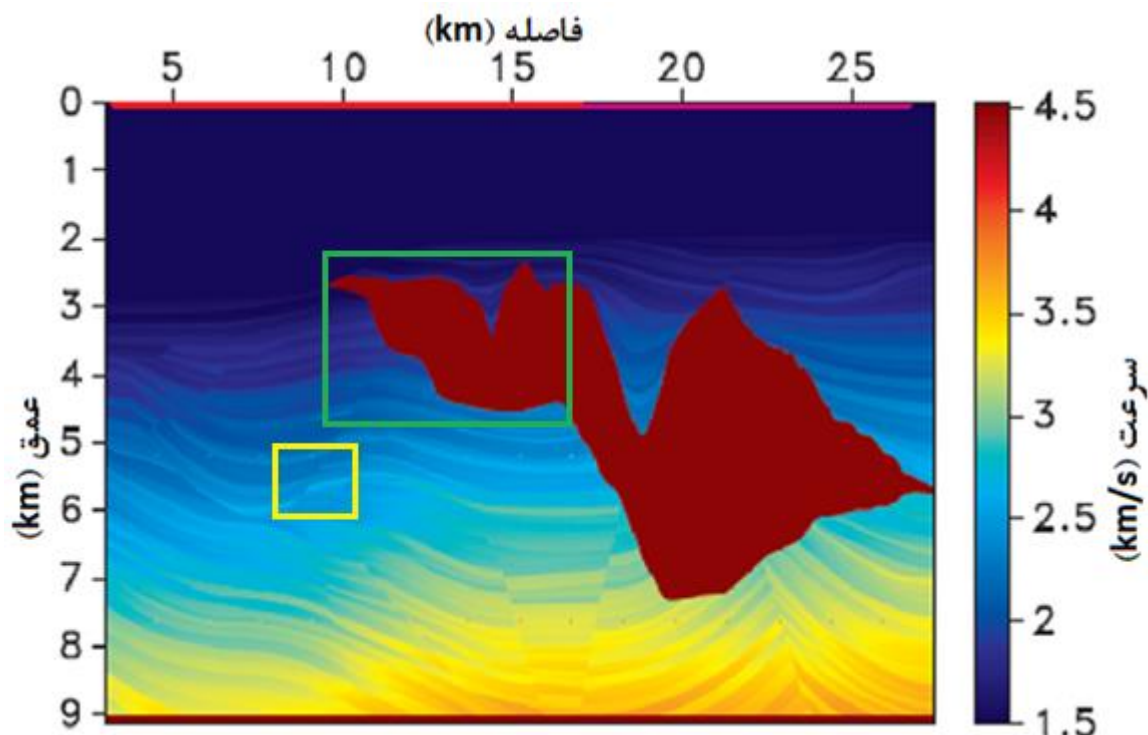
شده و پارامتر اندازه‌گیری فشار است. تمام داده‌های برداشت شده به سطح مرجع افقی که چشمه‌ها و گیرنده‌ها بر روی آن قرار دارند اختصاص داده شده است. در جدول ۳-۱ برخی از پارامترهای داده آمده است.

این داده شامل توده‌ای پرسرعت (نمک) با انحنای زیاد است که باعث ایجاد پراش‌های فراوان شده است. سرعت موج در نمک در این داده ۱۴۸۰۰ فوت بر ثانیه در نظر گرفته شده است. افزایش سرعت در قسمت رسوبی (سمت چپ مدل) مطابق رابطه  $V = V_0 + kZ$  تهیه شده که در آن  $V_0$  برابر ۵۰۰۰ فوت بر ثانیه و  $Z$  میزان عمق نسبت به سطح آب است. در شکل ۳-۸ این توده نمک قابل مشاهده است.

جدول ۳-۱: پارامترهای داده مصنوعی Sigsbee 2A

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| تعداد چشمه‌ها            | ۵۰۰          |
| فاصله چشمه‌ها            | ۱۵۰ فوت      |
| تعداد گیرنده‌ها          | ۳۴۸          |
| فاصله گیرنده‌ها          | ۷۵ فوت       |
| زمان ثبت                 | ۱۲ ثانیه     |
| فاصله نمونه‌برداری زمانی | ۸ میلی ثانیه |
| فرکانس غالب              | ۲۰ هرتز      |

در طراحی این داده در قسمت راست، گنبد نمکی و در قسمت چپ، گسل‌های متعددی مشاهده می‌شود که در شکل ۳-۸ نشان داده شده است، همچنین مدل‌های سرعت انتخاب شده از این داده در شکل مشخص شده است.



شکل ۳-۸: گنبد نمکی و گسل‌های داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A؛ توده پر سرعت گنبد نمکی می-باشد [فلوری، ۲۰۱۲].

برای آزمایش عملکرد روش کوچ زمانی معکوس (RTM)، این پردازش بر قسمتی از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی اعمال می‌شود. استفاده از تنها بخشی از داده‌های لرزه‌ای به این دلیل است که پردازش فوق بسیار زمان‌بر است. به عنوان مثال زمان پردازشی کوچ زمانی معکوس بر مدل سرعت شکل ۳-۹ که از هر ۱۲ نمونه یک نمونه انتخاب شده و تعداد چشمه‌ها ۲۰۰ می‌باشد، توسط سیستمی با پردازنده CPU=core i3-370M و RAM=4 بیست ساعت به طول انجامید. علاوه بر این تصاویر لحظه‌ای ایجاد شده در اثر اعمال این پردازش حجم زیادی از حافظه رایانه را می‌طلبد و این فرایند در مجموع نیاز به امکانات محاسباتی پر قدرت دارد که در اختیار نبود.

برای بدست آوردن مدل سرعت حاصل از داده لرزه‌ای مصنوعی به دلایلی که در بالا ذکر شد، ابتدا

بایستی با استفاده از نمونه‌گیری<sup>۱</sup> از داده فوق، مدل سرعتی که حجم بسیار کوچک‌تری نسبت به داده اصلی می‌داشت، تهیه کرد. در مرحله بعد مدل سرعت فوق به عنوان ورودی توسط کدهای مربوطه در نرم‌افزار MATLAB خوانده می‌شود. سپس با استفاده از مدل سرعت یک برداشت لرزه‌ای شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی بدین منظور انجام می‌شود که برداشتهای چشمه مشترک<sup>۲</sup> تولید شوند. این کار با استفاده از شبیه‌سازی انتشار موج پایین‌رونده و بالا‌رونده بر مدل سرعت که به عنوان ساختار زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود، انجام می‌گیرد. با حل معادله موج شبیه‌سازی شده به روش عددی تفاضل محدود تصاویر لحظه‌ای مربوط به میدان موج پایین‌رونده و میدان موج بالا‌رونده در گام‌های زمانی متوالی  $dt$  بدست می‌آید. با ضرب تصویر لحظه‌ای حاصل از میدان موج پایین‌رونده و تصویر لحظه‌ای تولید شده در زمان متناظر آن، از میدان موج بالا‌رونده، تصویر لحظه‌ای کوچ زمانی معکوس<sup>۳</sup> مربوط به آن زمان تولید شده و با جمع کردن تمامی تصاویر لحظه‌ای کوچ زمانی معکوس، مقطع لرزه‌ای حاصل از روش کوچ زمانی معکوس بدست می‌آید. در صنعت شاخص گام زمانی  $dt$  را ۱ یا ۲ میلی ثانیه در نظر می‌گیرند که تعداد زیادی تصویر لحظه‌ای تولید می‌شود. برای مثال از یک مقطع زمانی ۶ ثانیه‌ای، ۶۰۰۰ یا ۳۰۰۰ تصویر لحظه‌ای تولید می‌شود که برای ذخیره کردن این تصاویر نیاز به حجم بالایی از حافظه می‌باشد. به دلیل اینکه این حجم از حافظه در اختیار نبود، در این تحقیق شاخص زمانی  $dt$  بزرگتر انتخاب شد، به عنوان مثال برای یک مقطع زمانی ۳ ثانیه‌ای این شاخص ۲۰ میلی ثانیه انتخاب شد.

در مرحله بعدی از روند اجرایی کدهای مربوطه بایستی زمان رسیده‌ها<sup>۴</sup> را بدست آورد که این عمل به روش ردیابی دوبعدی پرتو انجام می‌شود.

با استفاده از زمان رسیده‌ها و برداشتهای چشمه مشترک تولید شده در مراحل قبل، مقطع کوچ

---

<sup>۱</sup> resample

<sup>۲</sup> Shot gather

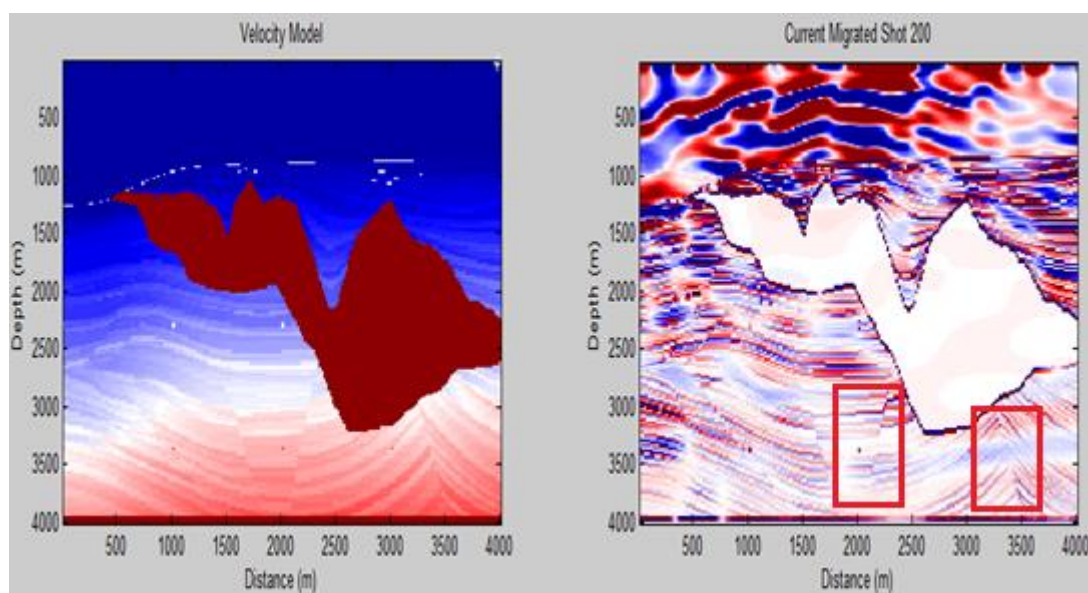
<sup>۳</sup> RTMsnapshot

<sup>۴</sup> travelttime

زمانی کیرشهوف تولید می‌شود.

و در انتها کوچ زمانی معکوس با استفاده از ورداشت‌های چشمه مشترک و تصاویر لحظه‌ای کوچ زمانی معکوس بدست می‌آید.

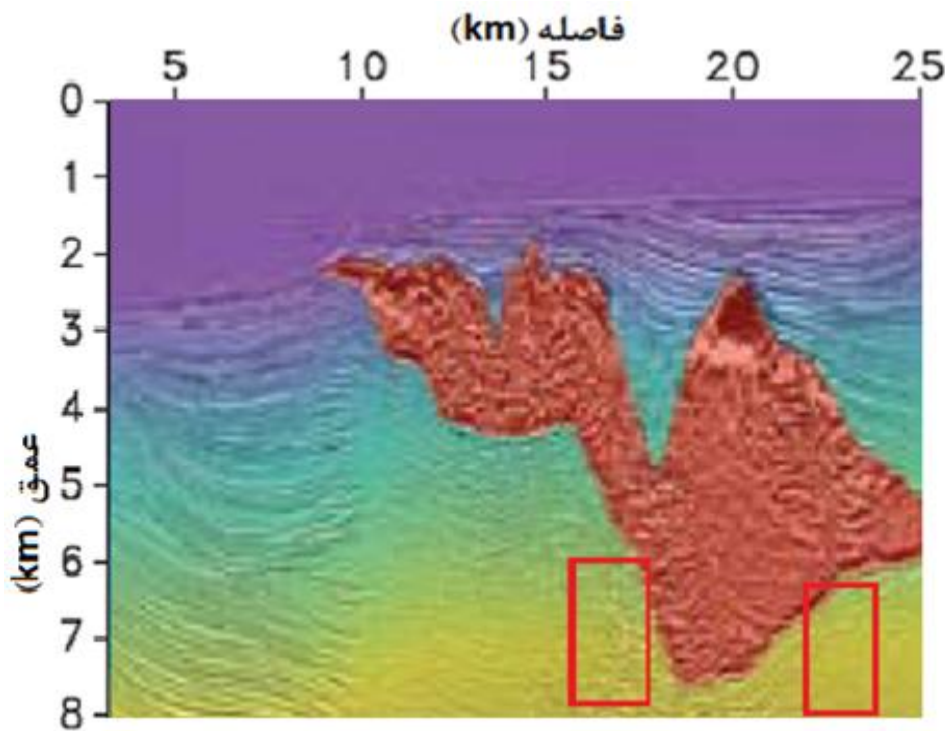
مدل سرعت شکل ۳-۹ که در سمت چپ شکل مشاهده می‌شود دارای سه بخش اصلی می‌باشد که قسمت بالایی آن آب، قسمت میانی آن توده نمکی پر سرعت و قسمت پایینی آن لایه‌های رسوبی و گسل می‌باشد که توده نمکی پر سرعت به رنگ قرمز مشخص شده است. این مدل سرعت با استفاده از نمونه‌گیری از داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee2A بدست آمده که از هر ۱۲ نمونه یک نمونه برداشت شده است. قسمت سمت راست شکل ۳-۹ مقطع لرزه‌ای بدست آمده از کوچ زمانی معکوس می‌باشد، همانطور که در شکل مشخص است با وجود اینکه مدل سرعت دقیق نمی‌باشد مرز توده نمکی به خوبی مشخص شده و همچنین گسلها و لایه‌بندی نیز تا حدودی مشخص می‌باشد.



شکل ۳-۹: مقطع کوچ زمانی معکوس بدست آمده از مدل سرعت داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A.

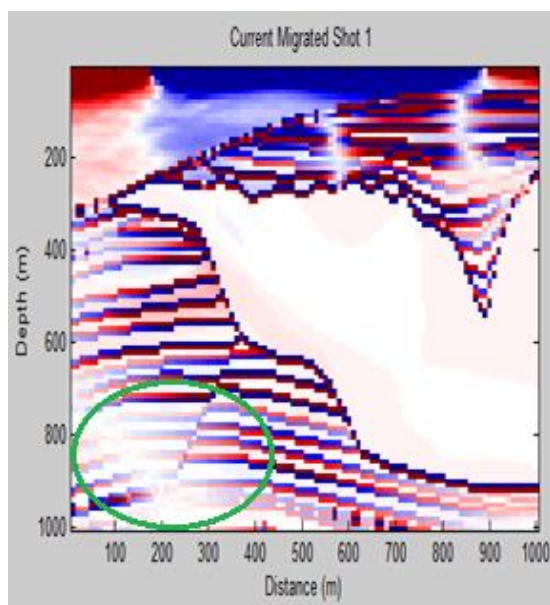
شکل ۳-۱۰ مقطع لرزه‌ای بدست آمده از پردازش به روش کوچ زمانی کیرشهوف می‌باشد که بر روی داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A اعمال شده است. با توجه به این شکل و شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود که روش کوچ زمانی معکوس تصویر مناسب‌تری از توده نمکی، گسلها و لایه‌های رسوبی

موجود در این داده، ارائه می‌دهد. این موضوع به وضوح در قسمت‌هایی که با مستطیل قرمز رنگ در شکل‌های فوق مشخص شده است دیده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود روش کوچ زمانی معکوس لایه‌بندی و گسلها را بسیار بهتر از روش کوچ زمانی کیرشهوف به تصویر می‌کشد.

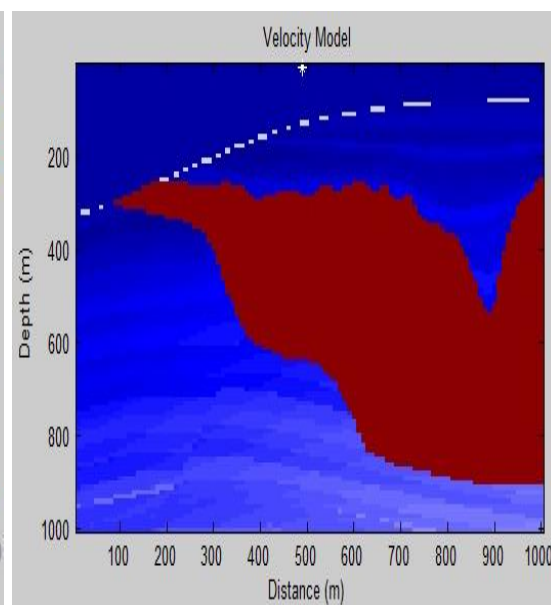


شکل ۳-۱۰: مقطع کوچ زمانی کیرشهوف بدست آمده از مدل سرعت داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A [http://www.pdgm.com]

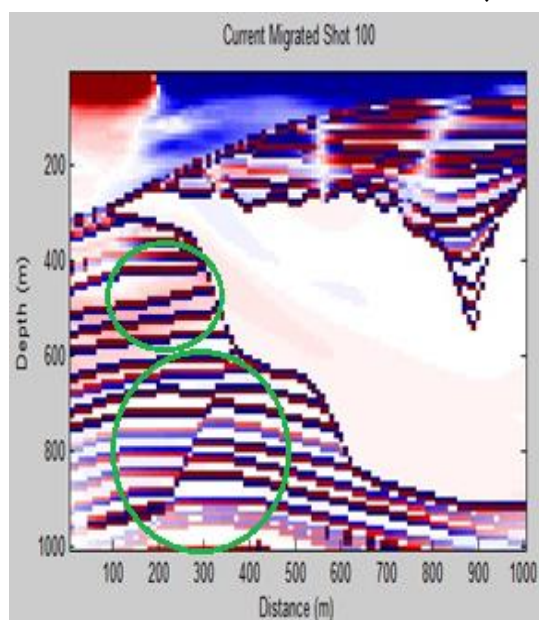
در ادامه برای اعمال کوچ زمانی معکوس از مدل سرعتی که قسمتی از توده نمکی داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A را شامل می‌شود و در آن از هر هشت نمونه یک نمونه برداشت شده است (شکل ۳-۱۱-الف) استفاده گردید. این مدل سرعت همانطور که مشاهده می‌شود شامل سه قسمت آب در بالا، توده نمکی در میانه شکل و لایه‌بندی و گسل در پایین شکل می‌باشد. در شکل ۳-۱۱-ب مقطع بدست آمده از روش RTM که مربوط به چشمه ابتدایی می‌باشد، نشان داده شده است، این شکل مرز توده نمکی را به خوبی مشخص کرده اما قسمتی از لایه‌بندی و گسلی که در شکل مشخص شده را به خوبی به تصویر نکشیده است که این موضوع در شکل کاملاً واضح است.



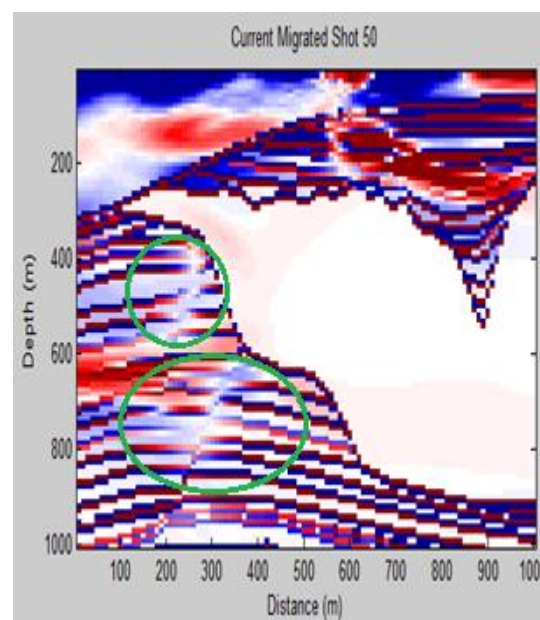
(ب)



(الف)



(د)



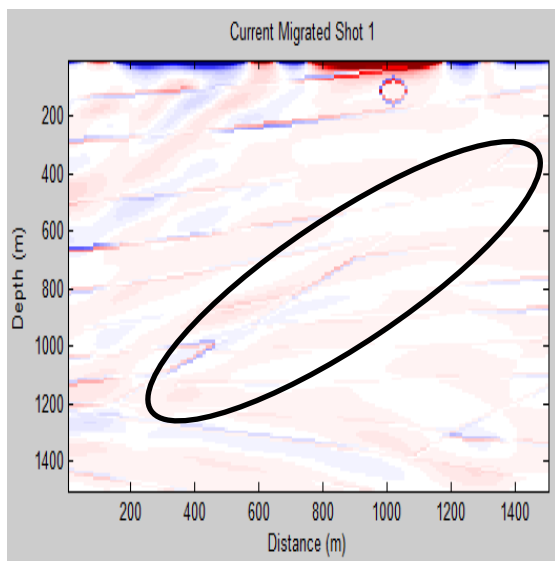
(ج)

شکل ۳-۱۱: الف) مدل سرعت حاصل از قسمتی از توده نمکی موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A. ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد.

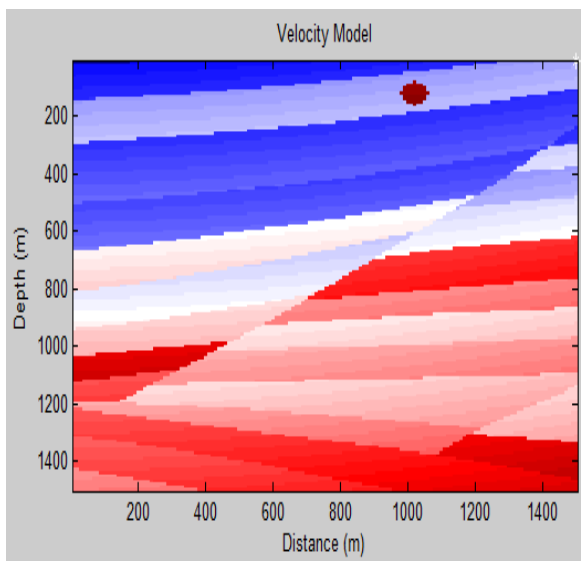
شکل ۳-۱۱-ج مقطع RTM بدست آمده از چشمه میانی می‌باشد. این شکل نیز مرز توده نمکی را به خوبی به تصویر کشیده اما قسمتی از گسل و لایه‌بندی را که در شکل مشخص شده‌اند نتوانسته

به خوبی به تصویر کشد که در شکل مشاهده می‌گردد. (شکل ۳-۱۱-د) مقطع RTM حاصل از چشمه انتهایی می‌باشد که این شکل همان‌گونه که مشاهده می‌شود علاوه بر توده نمکی توانسته لایه‌بندی و گسل را به خوبی به تصویر کشد که در شکل کاملاً مشخص است.

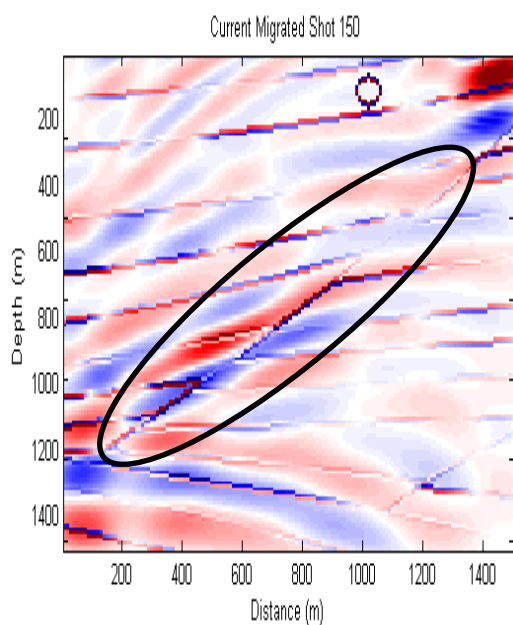
حال با استفاده از داده Sigsbee 2A و برای بررسی بیشتر، اعمال کوچ زمانی معکوس مدل سرعتی که فقط دارای لایه‌بندی و گسل است را مورد پردازش قرار داده و نتایج حاصل مورد بحث قرار می‌گیرد. شکل ۳-۱۲-الف مدل سرعت گسلی که شامل دو گسل است را نشان می‌دهد. در این مدل سرعت از هر هشت نمونه یک نمونه برداشت شده است. در شکل ۳-۱۲ قسمت‌های "ب" و "ج" و "د" هر سه با روش کوچ زمانی معکوس پردازش شده‌اند و تنها تفاوت آنها در نوع چشمه می‌باشد که به ترتیب از نوع چشمه ابتدایی، میانی و انتهایی می‌باشند. همانند شکل قبل، در این شکل نیز مقطع RTM حاصل از چشمه انتهایی تصویر مناسب‌تر و دقیق‌تری از گسل ارائه می‌دهد. مرز گسل و لایه‌بندی در شکل ۳-۱۲-د به خوبی به تصویر کشیده شده است.



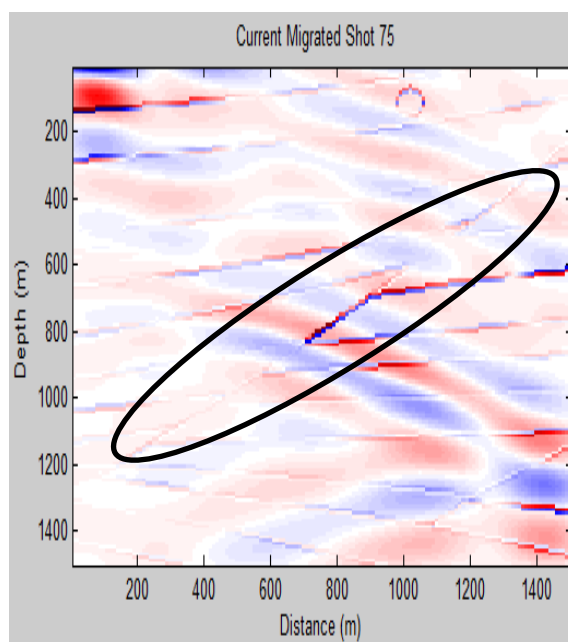
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳-۱۲: الف) مدل سرعت گسلی حاصل از قسمتی از داده لرزه‌ای مصنوعی Sigsbee 2A. ب) مقطع لرزه-ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد.

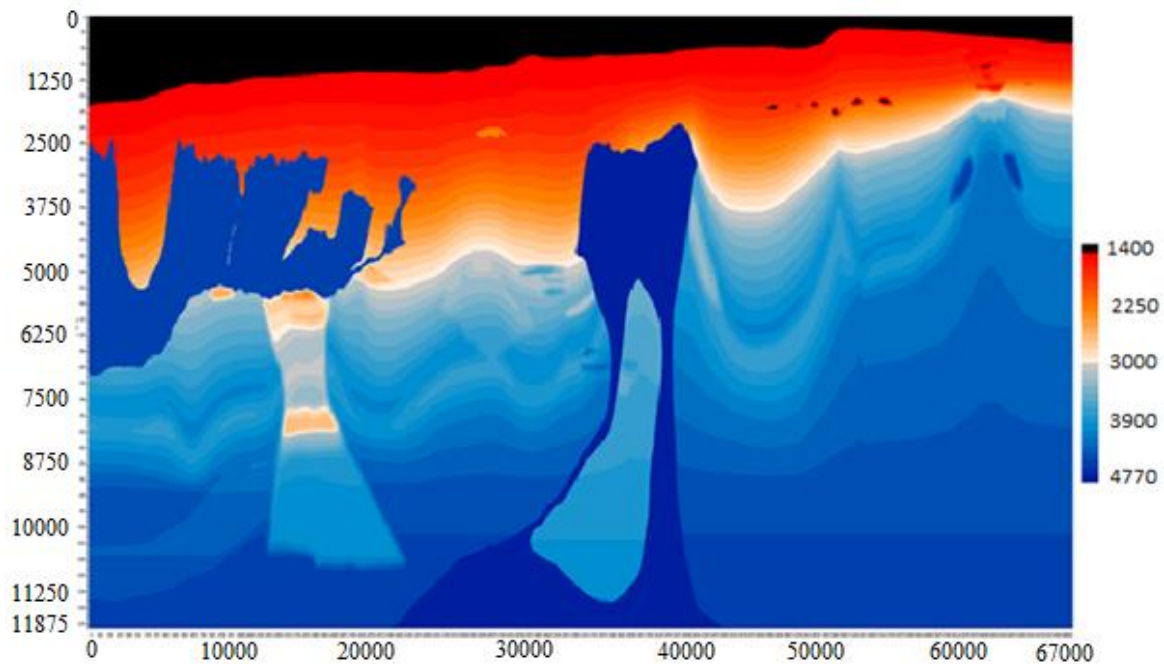
### ۳-۴-۲ داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004

داده لرزه‌ای BP-2004 به عنوان یک داده لرزه‌ای مصنوعی استاندارد استفاده شده است که این داده از روی مدل‌های واقعی یکی از ساختارهای زمین‌شناسی موجود در خلیج مکزیک و همچنین ساختارهای زمین‌شناسی موجود در غرب آفریقا شبیه‌سازی شده است. این داده نیز همانند داده لرزه-ای Sigsbee 2A به کمک تکنیک تفاضل محدود (FD) ساخته شده است. این مدل در واقع الگویی از برداشت لرزه‌ای دریایی است که هم دارای لایه‌های رسوبی و افقی بوده و هم دارای ساختارهای گنبدی شکل با هندسه پیچیده می‌باشد و در قسمت سمت راست داده فوق یک ساختار تاقدیس مانند و یک ساختار ناودیس مانند مشاهده می‌شود. در جدول ۳-۲ برخی از پارامترهای داده نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: پارامترهای داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004

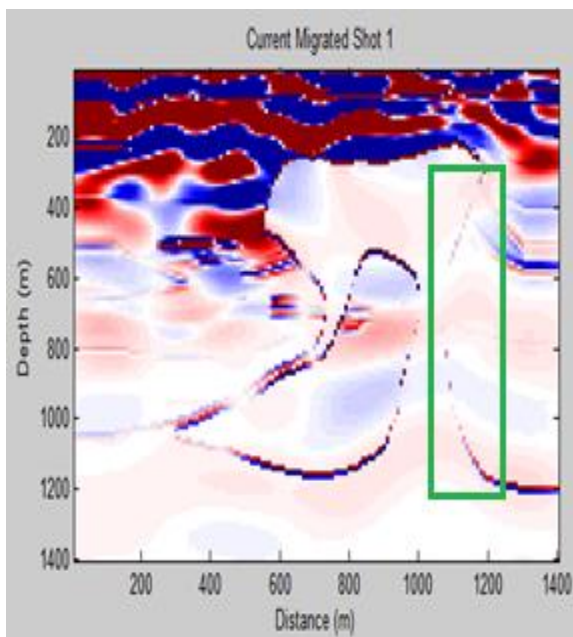
|                   |                          |
|-------------------|--------------------------|
| ۱۳۴۰              | تعداد چشمه‌ها            |
| ۵۰ متر            | فاصله چشمه‌ها            |
| ۱۲۰۱              | تعداد گیرنده‌ها          |
| ۱۲/۵ متر          | فاصله گیرنده‌ها          |
| ۱۴ ثانیه          | زمان ثبت                 |
| ۶ میلی ثانیه      | فاصله نمونه برداری زمانی |
| ۲۷ هرتز           | فرکانس غالب              |
| ۰/۵ هرتز          | فرکانس پایین             |
| ۱۵ کیلومتر        | طول streamer             |
| ۱۴۸۶ متر بر ثانیه | سرعت متوسط آب            |
| ۴۵۱۰ متر بر ثانیه | سرعت گنبد نمکی چپ        |
| ۴۷۹۰ متر بر ثانیه | سرعت گنبد نمکی راست      |

این داده شامل توده‌ای پرسرعت (نمک) با انحنای زیاد است که باعث ایجاد پراش‌های فراوان شده است. سرعت موج در گنبد نمکی سمت چپ کمتر از سرعت موج در گنبد نمکی سمت راست می‌باشد. در شکل ۳-۱۳ ساختارهای موجود در این داده لرزه‌ای قابل مشاهده است.

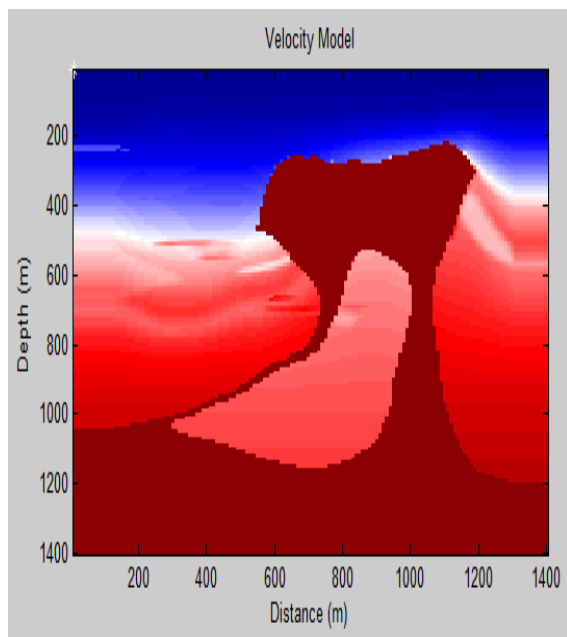


شکل ۳-۱۳: ساختارهای زمین‌شناسی موجود در داده لرزه‌ای BP-2004.

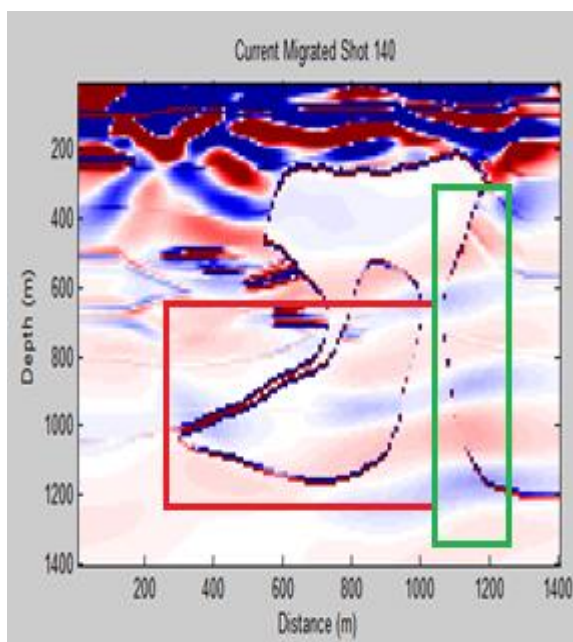
با استفاده از داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004 دو مدل سرعت برای اعمال کوچ زمانی معکوس تهیه شده است. در شکل ۳-۱۴ الف مدل سرعت حاصل از توده نمکی سمت راست داده فوق نشان داده شده است. این مدل سرعت به این صورت که از هر ۱۰ نمونه یک نمونه از داده اصلی انتخاب می‌شود، تهیه شده است. به همین دلیل مدل سرعت فوق مدل دقیقی نمی‌باشد، اما همان‌گونه که در قسمت‌های "ب" و "ج" و "د" مشاهده می‌شود مرز توده نمکی به خوبی به تصویر کشیده شده است. قسمتی که با مستطیل سبز رنگ در شکل مشخص شده است برای مقایسه چشمه‌های ابتدایی، میانی و انتهایی انتخاب شده است و همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقطع RTM حاصل از چشمه انتهایی تصویر به مراتب بهتری نسبت به چشمه ابتدایی ارائه می‌دهد.



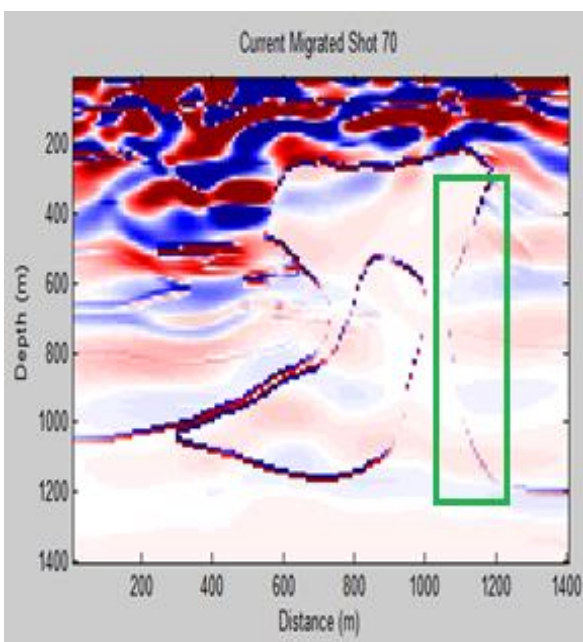
(ب)



(الف)



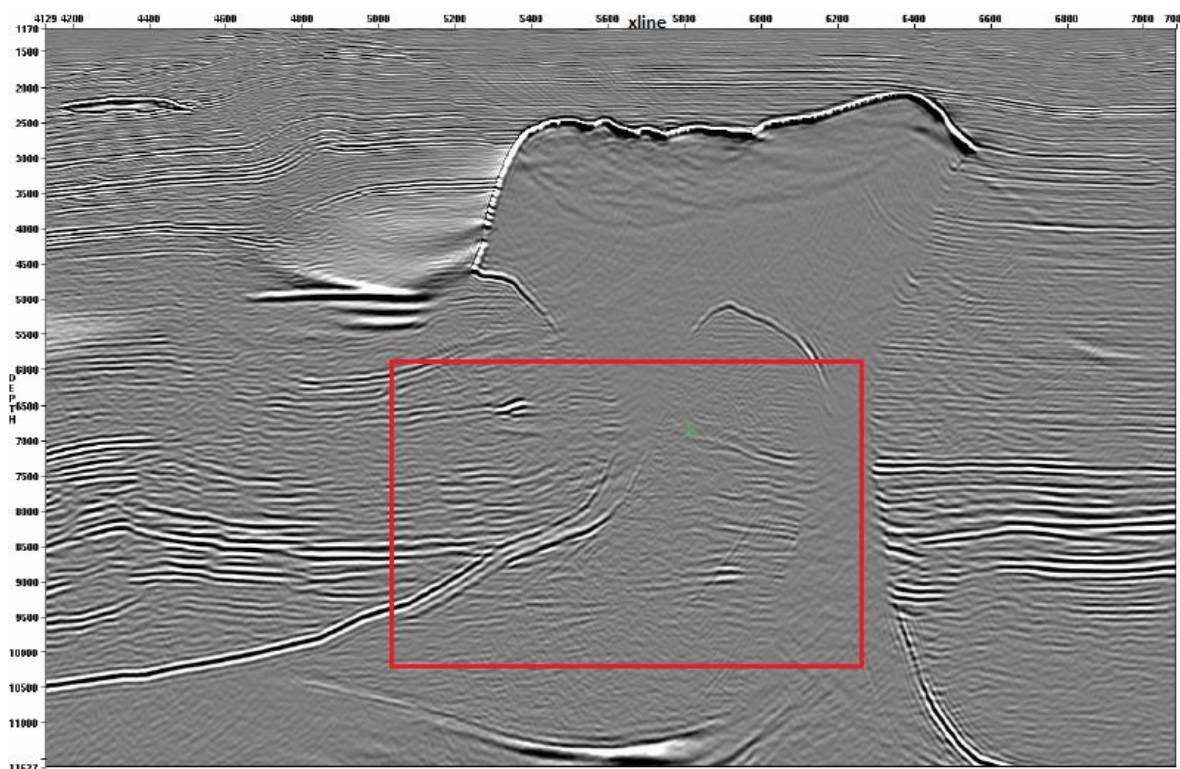
(ج)



(د)

شکل ۳-۱۴: الف) مدل سرعت حاصل از توده نمکی سمت راست موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004. ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد.

شکل ۳-۱۵ مقطع لرزه‌ای بدست آمده از پردازش به روش کوچ زمانی کیرشهوف می‌باشد که بر روی گنبد نمکی سمت راست موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004 اعمال شده است. با توجه به این شکل و قسمت "د" شکل ۳-۱۴ مشاهده می‌شود که روش کوچ زمانی معکوس به دلیل اینکه بر اساس حل معادله موج دوطرفه عمل می‌کند در مقایسه با روش کوچ زمانی کیرشهوف که بر مبنای حل معادله موج یک‌طرفه می‌باشد، تصویر مناسب‌تری از مرز توده نمکی پر سرعت ارائه می‌دهد و این توده را با کیفیت بالاتری به تصویر می‌کشد. این موضوع به وضوح در قسمتی که با مستطیل قرمز رنگ در شکل‌های فوق مشخص شده، دیده می‌شود.

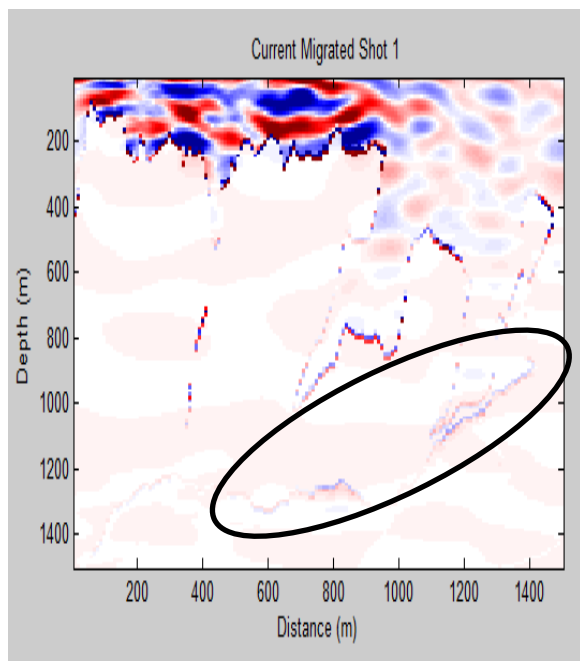


شکل ۳-۱۵: مقطع لرزه‌ای بدست آمده از پردازش به روش کوچ زمانی کیرشهوف که بر گنبد نمکی سمت راست موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004 اعمال شده است [فارمر، ۲۰۰۶].

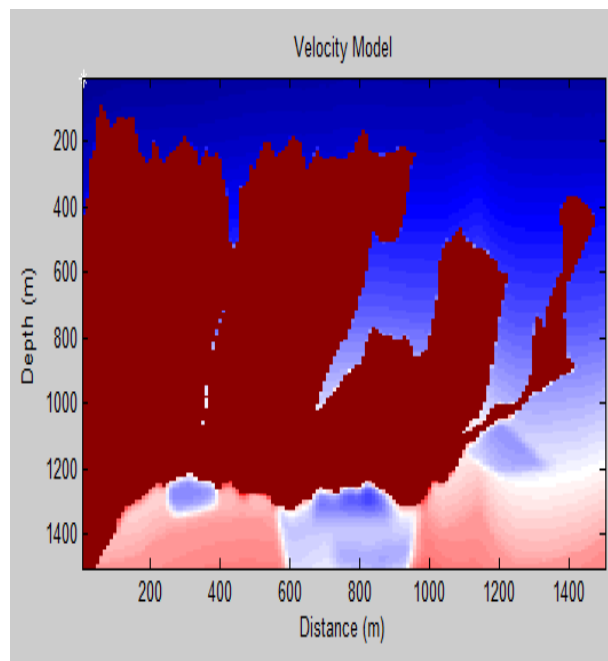
در شکل ۳-۱۶ الف مدل سرعت حاصل از توده نمکی سمت چپ داده BP-2004 نشان داده شده است. این مدل سرعت به این صورت که از هر ۱۰ نمونه یک نمونه از داده اصلی انتخاب می‌شود، تهیه شده است؛ به همین دلیل مدل سرعت فوق مدل بسیار دقیقی نمی‌باشد. شکل ۳-۱۶ ب مقطع RTM

بدست آمده از چشمه ابتدایی می باشد که تا حدودی توانسته مرز توده پرسرعت نمکی را مشخص کند اما همانطور که در شکل مشاهده می شود مرز پایینی توده نمکی در شکل ۳-۱۶-د با کیفیت بالاتری به تصویر کشیده شده است که این قسمت در شکل مشخص شده است.

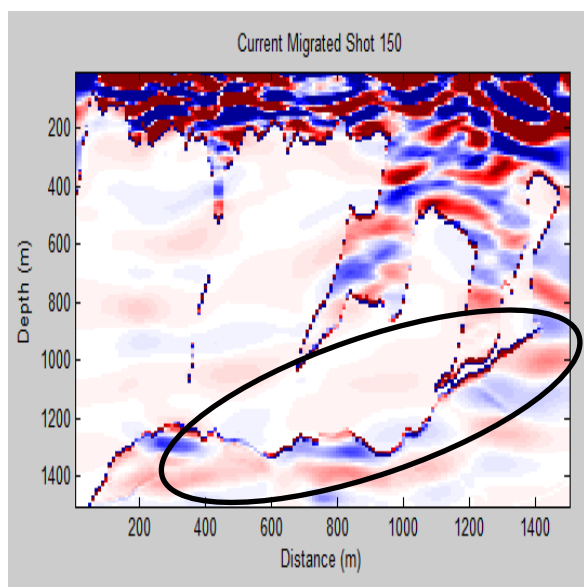
در شکل قسمتی که با بیضی مشخص شده برای مقایسه چشمه های ابتدایی، میانی و انتهایی انتخاب شده است و همانگونه که مشاهده می شود مقطع RTM حاصل از چشمه انتهایی تصویر به مراتب بهتری نسبت به چشمه ابتدایی ارائه می دهد.



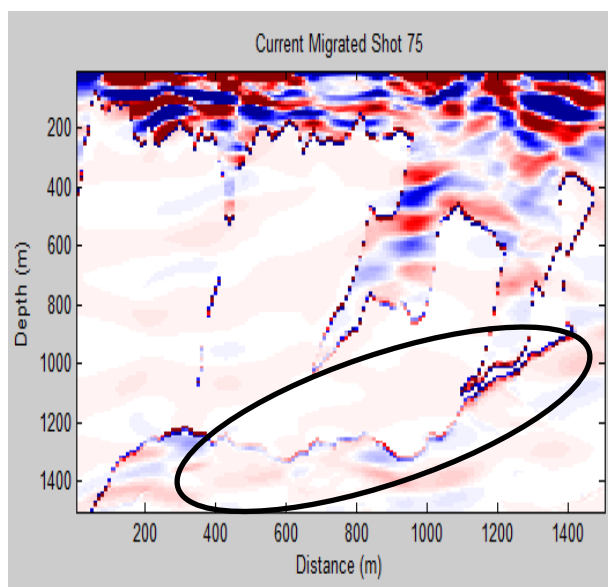
(ب)



(الف)



(د)



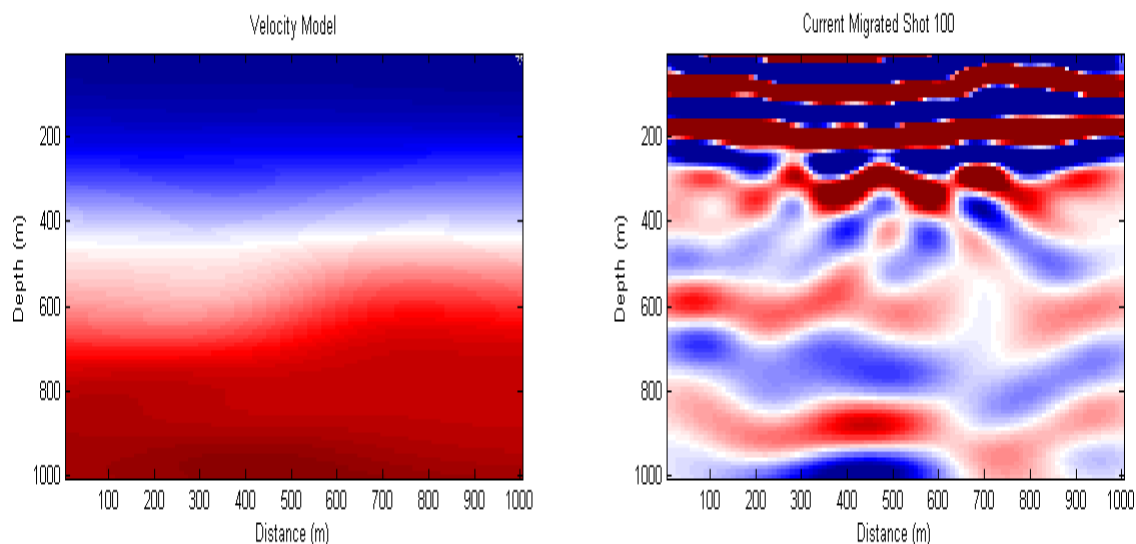
(ج)

شکل ۳-۱۶: الف) مدل سرعت حاصل از توده نمکی سمت چپ موجود در داده لرزه‌ای مصنوعی BP-2004. ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه ابتدایی. ج) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه میانی. د) مقطع لرزه‌ای حاصل از کوچ زمانی معکوس برای چشمه انتهایی؛ مشاهده می‌شود که کیفیت مقطع در چشمه انتهایی افزایش می‌یابد.

### ۳-۴-۳ داده لرزه‌ای واقعی

در پایان به این نکته اشاره می‌شود که روش پردازشی مورد استفاده در این پایان‌نامه را روی داده‌های واقعی در دو منطقه یکی در غرب ایران و دیگری در مرز آلمان و فرانسه اعمال شد؛ به این صورت که با اعمال پیش‌پردازش روی داده‌های فوق با استفاده از نرم‌افزار Promax و تهیه مدل سرعت با استفاده از همین نرم‌افزار، مدل‌های سرعت فوق به کدهای مربوطه در نرم افزار متلب داده شد که به دلیل نداشتن امکانات سخت‌افزاری و محاسباتی مناسب، نتیجه قابل قبولی بدست نیامد.

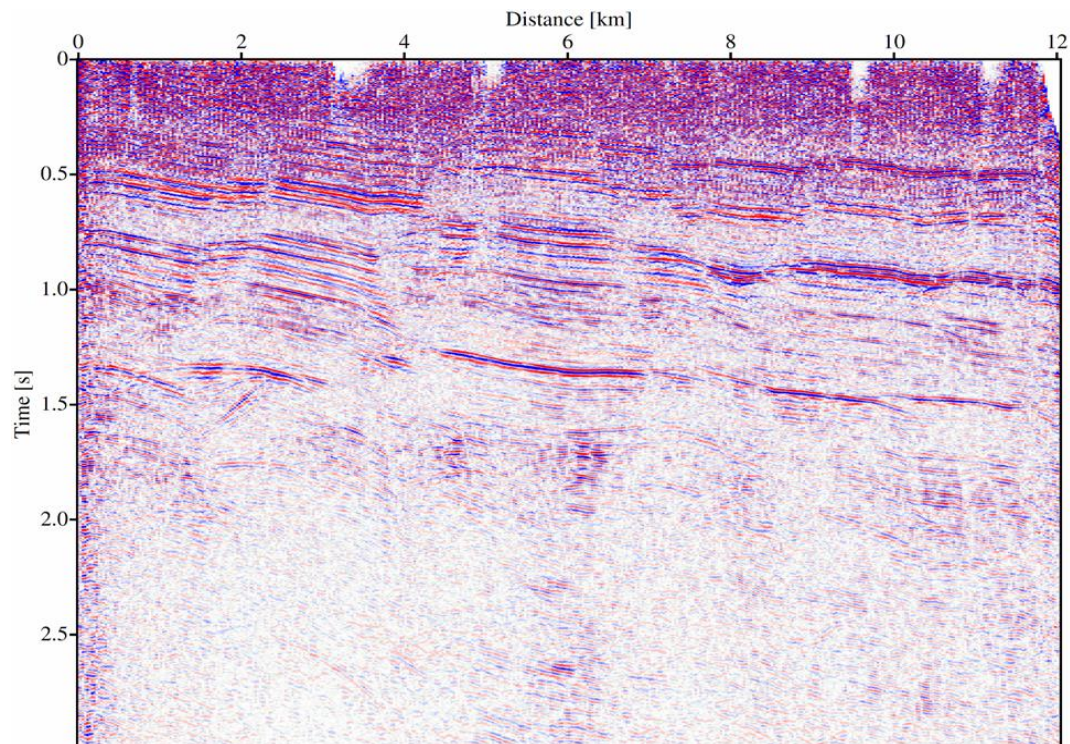
بعد از بدست آوردن مدل سرعت از داده واقعی مرز آلمان و فرانسه که در سمت چپ شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است، روش‌های کوچ زمانی کیرشهوف و معکوس را اعمال کرده و مقاطع لرزه‌ای حاصل می‌شوند. سمت راست شکل زیر مقطع لرزه‌ای حاصل از روش کوچ زمانی معکوس می‌باشد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود این روش نتوانسته تصویر مناسبی از ساختارهای زیرسطحی ارائه کند.



شکل ۳-۱۷: مقطع لرزه‌ای بدست آمده از روش کوچ زمانی معکوس که بر داده واقعی مرز آلمان و فرانسه اعمال شده است.

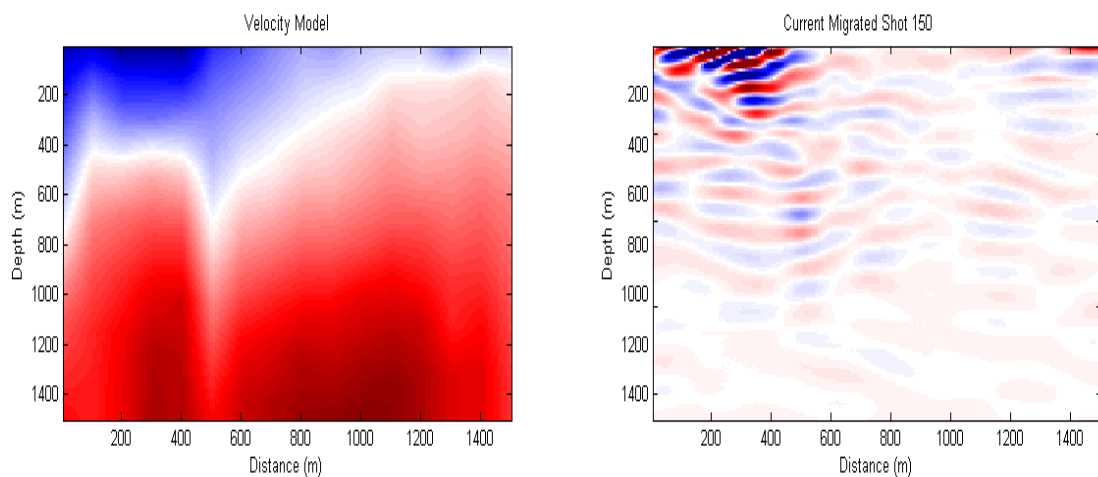
با مقایسه قرار دادن مقاطع لرزه‌ای RTM و PSTM بدست آمده از داده فوق مشخص می‌شود که روش RTM به دلیل در اختیار نداشتن امکانات سخت‌افزاری و محاسباتی و همچنین با توجه به اینکه

کدهای مربوطه صنعتی نبود این روش جواب قابل قبولی ارائه نداد که شکل ۳-۱۸ مقطع PSTM این منطقه را به تصویر کشیده است.

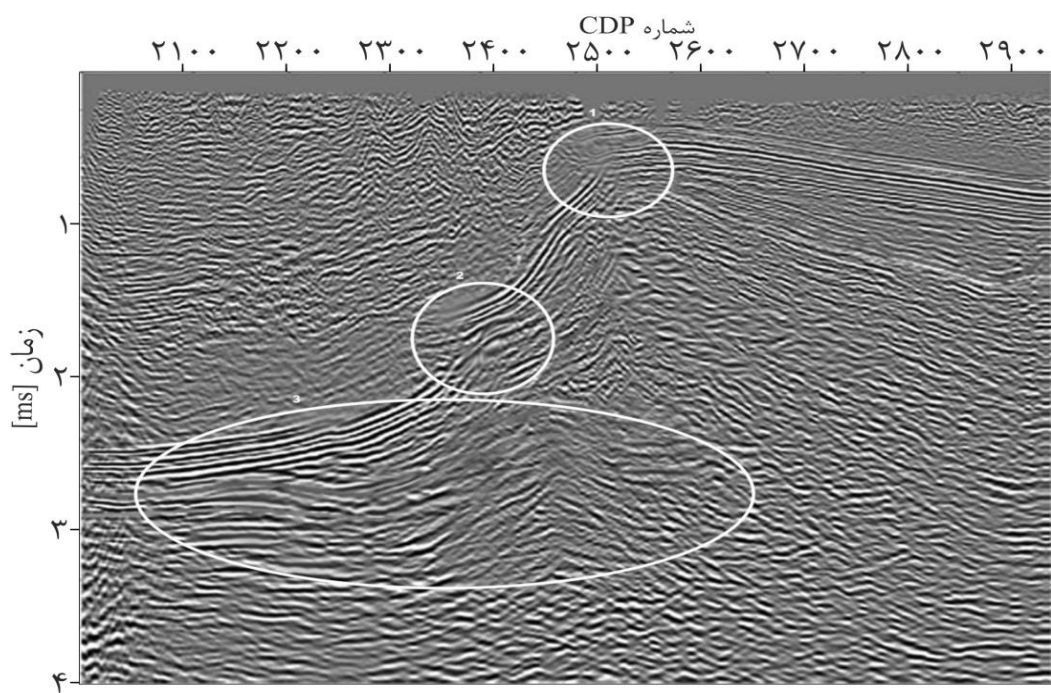


شکل ۳-۱۸: مقطع PSTM بدست آمده از داده برداشت شده در مرز آلمان و فرانسه.

در انتها برای اعمال روش پردازشی مورد بحث در این پایان نامه بر داده واقعی برداشت شده در غرب ایران، بعد از بدست آوردن مدل سرعت از داده فوق که در سمت چپ شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است، روش‌های کوچ زمانی کیرشهوف و معکوس را اعمال کرده و مقاطع لرزه‌ای حاصل می‌شوند. سمت راست شکل زیر مقطع لرزه‌ای حاصل از روش کوچ زمانی معکوس بر روی این داده می‌باشد. با مقایسه قرار دادن مقاطع لرزه‌ای RTM و PSTM بدست آمده از منطقه فوق مشخص می‌شود که روش RTM به دلایلی که قبلاً ذکر شد جواب قابل قبولی ارائه نداد و همانگونه که در شکل ۳-۱۹ و شکل ۳-۲۰ مشاهده می‌شود این روش نتوانسته تصویر مناسبی از داده فوق ارائه دهد.



شکل ۳-۱۹: مقطع لرزه‌ای بدست آمده از روش کوچ زمانی معکوس که بر داده واقعی برداشت شده در غرب ایران اعمال شده است.



شکل ۳-۲۰: مقطع PSTM تولید شده از داده لرزه‌ای برداشت شده در غرب ایران.

## نتیجہ گیری و پیشہادات

## ۱-۴ نتایج

در این تحقیق جهت بررسی عملکرد روش کوچ زمانی معکوس دو داده‌ی لرزه‌ای مصنوعی و دو داده لرزه‌ای واقعی با ساختاری پیچیده در نظر گرفته شد. در ابتدا با استفاده از مدل‌های سرعت تهیه شده از داده‌های فوق یک برداشت لرزه‌ای شبیه‌سازی می‌شود تا برداشت‌های چشمه مشترک تولید شوند، سپس با حل معادله موج با استفاده از روش عددی تفاضل محدود تصاویر لحظه‌ای ایجاد می‌شوند. با داشتن برداشت‌های چشمه مشترک و تصاویر لحظه‌ای تولید شده در مراحل قبل، مقاطع لرزه‌ای حاصل از روش‌های کوچ زمانی معکوس و کیرشهوف بدست می‌آیند که در انتها مقاطع لرزه‌ای بدست آمده مورد مقایسه قرار گرفت.

کوچ زمانی معکوس به دلیل اینکه بر پایه معادله موج دوطرفه عمل می‌کند، در مقاطع لرزه‌ای با ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، نسبت به دیگر روش‌های کوچ، که بر پایه معادله موج یک‌طرفه عمل می‌کنند، تصویرسازی مناسب‌تر و دقیق‌تری از ساختارهای زیرسطحی ارائه می‌دهد، که این موضوع به وضوح در مقاطع تولید شده مشاهده گردید.

در این تحقیق با مقایسه قرار دادن مقاطع لرزه‌ای RTM حاصل شده از چشمه‌های ابتدایی، میانی و انتهایی مشاهده شد که مقطع انتهایی RTM تصویر مناسب‌تری نسبت به چشمه ابتدایی و میانی ارائه می‌دهد. هرچه تعداد تصاویر لحظه‌ای از میدانهای موج بالارونده و پایین‌رونده بیشتر باشد، یا به عبارت دیگر هرچه گام زمانی  $dt$  کوچکتر باشد، تصویر نهایی کوچ زمانی معکوس دقیق‌تر می‌شود، اما بدلیل اینکه زمان پردازشی این روش بسیار زمانبر است و همچنین تصاویر لحظه‌ای تولید شده حجم

بالایی از حافظه را می‌طلبد، امکانات سخت‌افزاری و محاسباتی پیشرفته‌تری مورد نیاز است. همچنین با مقایسه قرار دادن مقاطع لرزه‌ای بدست آمده از روش پردازشی RTM این نتیجه حاصل شد که، مقطع بدست آمده از کوچ زمانی معکوس دقیق‌تر از مقطع برانبارش آن می‌باشد.

برخی از مزایای روش کوچ زمانی معکوس از قرار زیر می‌باشد:

- محدودیت شیب و به دنبال آن حساسیتی به مدل سرعت ندارد.
- در محیط‌های همسانگرد و ناهمسانگرد کاربرد دارد.
- موج‌های بازگشتی، پرتوهای نزدیک افق، موج‌های منشوری و چندگانه‌ها را به تصویر می‌کشد.

معایب روش کوچ زمانی معکوس:

- این روش پردازشی بسیار زمانبر است.
- تصاویر لحظه‌ای تولید شده در این روش پردازشی حجم بالایی از حافظه را اشغال می‌کنند.

با توجه به اینکه در روش پردازشی مورد استفاده در این تحقیق، برداشت‌های چشمه مشترک توسط شبیه‌سازی برداشت لرزه‌ای از روی مدل سرعت، تولید می‌شوند، به نظر می‌رسد که این برداشت‌های چشمه مشترک زیاد دقیق نباشند، به همین دلیل پیشنهاد می‌شود که این روش بر مبنای داده بازنویسی شود.

## منابع

خلیلزاده، ع، ۱۳۹۲، پایان نامه ارشد، تصویر سازی لرزه ای ساختارهای پیچیده با استفاده از تلفیق کوچ زمانی پیش از بر انبارش و روش بر انبارش سطح بازتاب مشترک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، شاهرود.

- Bording, R.P., Lines, L.R., (1997). Seismic modelling and imaging with the complete wave equation, SEG Publication.
- Buttkus, B., (2000), "Spectral analysis and filter theory in Applied Geophysics", Springer Verlag, Berlin.
- Berkovitch A., Deev K., Geomage, Landa E., OPERA, (2012) "Non-hyperbolic MultiFocusing improves depth imaging" 9<sup>th</sup> Biennial international conference & Exposition on petroleum geophysics.
- Cerveny, V., 2001, Seismic Ray Theory: Cambridge University Press, Cambridge.
- Farmer, P., (2006). Reverse Time Migration Pushing Beyond Wave Equation, EAGE. Vienna.
- Fleury, C., (2012). Increasing illumination and sensitivity of reverse time migration with internal multiples, Center for Wave Phenomena, Colorado school of mines.
- Hill, N. R.(2001) Prestack Gaussian-beam depth migration: Geophysics, 66, 1240-1250
- Haniga, A. (1984). Seismic Wave Propagation in the Earth. In Haniga, A., editor, Physics and Evolution of the Earth's Interior 2. Elsevier, Amsterdam.
- Hubral, P., Schleicher, J., and Tygel, M. (1996). A unified approach to 3-D seismic reflection imaging, part I: basic concepts. Geophysics, **61**(3),742–758.
- Kaelin, B., Gitton, A., (2006). imaging condition for reverse time migration, SEG Publication.
- Kienast, M., (2007), CRS stack based limited-aperture Kirchhoff migration-application and comparison in time and depth domain: Master's thesis, University of Karlsruhe, Germany.
- Kravtsov, Y. and Orlov, Y. (1990). Geometrical Optics of Inhomogeneous Media. Springer Verlag, New York.
- Liner, L. (1999). Concepts of normal and dip moveout. Geophysics, 64:1637–1647.
- Luneburg, R. (1966). Mathematical Theory of Optics. Univ. of California Press, Berkeley.

- Mann, J., Höcht, G., Jäger, R., and Hubral, P. (1999). Common Reflection Surface stack – an attribute analysis. In Extended abstracts, 61st Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. Session P140.
- Popov, M., (1996), Ray Theory and Gaussian Beam Method for Geophysicists: Universidade Federal da Bahia.
- Robein, E. (2003). “Velocities, time imaging and depth imaging in reflection seismic, principles and methods”, Eur. Assn. Geosci. Eng. Press. Netherlands.
- Robein, E., (2010). Seismic imaging A review of the techniques their principles. Merits and limitation, EAGE Publication.
- Schuster, G.T, (2010). Basic of Seismic Imaging, Univ. of Cambridge Press.
- Spinner, E,T. (2007). CRS-based minimum-aperture Kirchhoff \_ migration in the time domain: PH.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany.
- Vermeer, G.J.O.,(2002), “3-D seismic survey design”. Soc. Expl. Geophys., Tulsa, USA.
- Yilmaz, Ö. (2001). “Seismic data analysis”, vols. 1 and 2. Soc. Expl. Geophys., Tulsa. USA.
- Zho, j., Lines, L. R., (1998). comparison of kirchhoff and reverse time migration methods with applications to prestack depth imaging of complex structures, SEG Publication.

<http://www.pdgm.com/resource-library/brochures/reverse-time-migration/reverse-time-migration/>

## **Abstract**

The ultimate goal of Seismic Data surveying and processing is achieving the images more accurate and realistic from subsurface phenomenon. One phase of data processing is; migrating seismic data including; back surgery events recorded diffraction peak of their migration not as a result of transmission events reflects their place integer and build a picture of structures inside the ground.

Reverse time migration based on mutual wave equation in seismic sections of the structures of complex migration comparing with other methods, which are based on one-way wave equation; presents more convenient and more precise imaging of subsurface structures. However, in high impedances and complicated geological structure, up going and down going wave fields can not be disprated. In these cases, the cross-correlation leads to a decreasing in the low artificial frequency which makes the better resolution of the wave source and the receiver.

In this research accuracy of performance in processing and visualization methods for reverse time migration seismic data in complex structures is studied. For these purpose, velocity model of seismic data by using artificial seismic data from two regions: Sigsbee 2A and BP-2004 By applying Kirchhoff time migration and reverse time migration seismic section are studied and obtained results were compared.

Also Processing methods are also discussed in this study on true l seismic data in two regions: in the west of Iran and in the west of Germany, was applied unfortunately, due to the lack of advanced computational hardware and softwareun acceptable results were obtained.

Keywords: seismic imaging, Reverse Time Migration, cross correlation, Wavefield Extrapolation.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

**M.S. Thesis**

Resolve problems seismic imaging of complex  
structures by reverse time migration (RTM) method , A  
case study in a west of Iran

Sajad Taghizadeh

Supervisors:  
Dr. Mehrdad Soleimani  
Dr. Iraj Pirooz

**May 2014**